

**EVALUACIÓN DE LA OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO UTILIZANDO
BAMBÚ DE LA ESPECIE CHUSQUEA SCANDENS KUNTH POR ACTIVACIÓN
FÍSICA**

CESAR SANTIAGO CUBILLOS PITA

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2019**

**EVALUACIÓN DE LA OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO UTILIZANDO
BAMBÚ DE LA ESPECIE CHUSQUEA SCANDENS KUNTH POR ACTIVACIÓN
FÍSICA.**

CESAR SANTIAGO CUBILLOS PITA

Proyecto integral de grado para optar por el título de:

INGENIERO QUÍMICO

Director:

**Diber Jeannette Pita Castañeda
Msc. Educación y gestión ambiental**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA QUÍMICA**

**BOGOTÁ D.C
2019**

Nota de aceptación

Juan Camilo Cely
Ingeniero Químico

Diana Marcela Cuesta
Ingeniera Ambiental

Bogotá, D.C. Agosto de 2019

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la institución y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCIA-PEÑA

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectoría Académica y de Posgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

Las directivas de la Universidad de América, los jurados, calificadores y el cuerpo de docentes no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

Dedico este trabajo a cada una de las personas que puso su grano de arena en él, y que motivaron cada una de estas palabras, porque sin ellos esto no sería una realidad.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la oportunidad de salir adelante con mis metas, y lograr culminarlas.

A mis padres que sin ellos no hubiese podido llegar hasta donde se puede pisar, siempre con ellos hay una luz de esperanza.

A la Fundación universidad de América por abrir sus puertas y brindar esta oportunidad de formación profesional.

A los colegas que estuvieron ahí para prestar su mano y apoyarnos mutuamente.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	20
OBJETIVOS	22
1. MARCO TEÓRICO	23
1.1 CONTEXTO HISTÓRICO DEL BAMBÚ	23
1.2 DESCRIPCIÓN Y MORFOLOGÍA DEL BAMBÚ	23
1.3 ESTRUCTURA DEL BAMBÚ	25
1.3.1 Rizoma	26
1.3.2 Culmo o tallo	27
1.3.3 Follaje	27
1.4 SIEMBRA	29
1.5 UTILIDAD DEL BAMBÚ	30
1.5.1 Fibra de Bambú	30
1.5.2 Madera	31
1.6 ESPECIE DE BAMBÚ CHUSQUEA SCANDENS KUNTH	32
1.7 CARBÓN PROVENIENTE DEL BAMBÚ	32
1.7.1 Propiedades fisicoquímicas del carbón activado	33
1.8 PRINCIPALES USOS DEL CARBÓN ACTIVADO	34
1.9 MÉTODOS PARA OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO	35
1.9.1 Activación Física	35
1.9.2 Activación Química	35
1.10 ADSORCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO	36
1.11 ANTECEDENTES DE LA PRODUCCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO	37
2. METODOLOGÍA	40
2.1 FASE TEÓRICA	40
2.1.1 ubicación geográfica toma de muestra:	41
2.1.2 Bambú para extracción y corte	42
2.2 FASE EXPERIMENTAL	42
2.2.1 Preparación de la biomasa para carbonización	42
2.2.2. Análisis inmediato del bambú chusquea scandens Kunth	43
2.2.3 Humedad	43
2.2.4 Material volátil	44
2.2.5 Cenizas	44
2.2.6 Contenido de carbono fijo	45
2.3 CONDICIONES DE MONTAJE PARA CARBONIZACIÓN	45
2.3.1 fase de carbonización del bambú	47
2.4 CONDICIONES PARA EL MONTAJE DE LA ACTIVACIÓN DE CARBÓN DE BAMBÚ	48
2.4.1 Fase de Activación del Carbón de Bambú	50

2.5. FASE DE EXPERIMENTACIÓN CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO DEL BAMBÚ	51
2.5.1 Ensayo de determinación de número de yodo	51
2.5.2. Determinación de la densidad aparente	54
2.5.3. Determinación del índice de azul de metileno	54
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	56
3.1 Selección de bambú según su maduración:	56
3.1.2 Análisis elemental de Bambú	57
3.1.3 Edad del culmo de bambú	59
3.2 SELECCIÓN DE BAMBÚ PARA CARBONIZACIÓN	59
3.2.1 Selección del culmo de bambú según las características físicas.	60
3.3 ANÁLISIS INMEDIATO DEL BAMBÚ CHUSQUEA SCANDENS KUNTH	60
3.4 CARBONIZACIÓN DEL BAMBÚ	61
3.5 ACTIVACIÓN DE BAMBÚ	63
3.6 Ensayo De Determinación De Número De Yodo	64
3.7 ÍNDICE DE AZUL DE METILENO	65
3.8 DENSIDAD APARENTE	66
4. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO	68
4.1 RENDIMIENTO	68
4.2 BALANCE DE MASA DEL PROCESO DE CARBONIZACIÓN DE BAMBÚ	70
4.3 BALANCE DE MASA DEL PROCESO DE ACTIVACIÓN DE CARBÓN DE BAMBÚ	72
5. EVALUACIÓN FINANCIERA	74
5.1 ACTIVOS FIJOS	74
5.1.1 Costos de Producción	74
5.2 COSTOS DIRECTOS	74
5.2.1 Materia Prima	75
5.2.2Mano de obra directa	75
5.3 COSTOS INDIRECTOS	75
5.3.1 Materiales indirectos	76
5.3.2 Mano de obra indirecta	76
5.3.3 Otros gastos indirectos	76
5.4 CARGAS FABRILES	76
5.5 DEPRECIACIÓN DE MATERIALES	77
5.6 COSTOS TOTALES	77
6. CONCLUSIONES	79
7. RECOMENDACIONES	80
8. BIBLIOGRAFÍA	81

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Estructura de bambú según su edad.	27
Figura 2. Rizoma de <i>Chusquea Scandens Kunth</i>	28
Figura 3. Patrón de crecimiento de la yema y brotes nuevos	28
Figura 4. Hojas de Bambú	29
Figura 5. Bambú <i>Dendroclamaus Maximulslamina</i> originaria China – <i>Bambusa Vulgaris</i> asiática	30
Figura 6. Bambú <i>Chusquea Scandens Kunth</i> , Tabio-Cundinamarca, Colombia.	30
Figura 7. Sección de la pared del culmo del Bambú	32
Figura 8. Carbón activado de <i>Chusquea Scandens Kunth</i>	36
Figura 9. Esquema metodológico	41
Figura 10. Mapa de ubicación geográfica de toma de muestras	42
Figura 11. Vista panorámica de la parcela de bambú <i>Chusquea scandens Kunth</i>	43
Figura 12. Selección de bambú según sus características físicas.	43
Figura 13. Bambú seco y bambú seco triturado para carbonización	44
Figura 14. Sistema de pirolisis para la obtención de carbón activado a partir de bambú	48
Figura 15. Sistema propuesto para la activación de carbón de bambú	51
Figura 16. Filtración de las muestras de carbón activado impregnadas con la solución de yodo 0,1N.	54
Figura 17. Titulación de solución de yodo residual, con solución de tiosulfato de sodio 0,1N la cual se rectifica con una solución de almidón estándar	54
Figura 18. Muestras de carbón activado impregnadas con la solución de azul de metileno	56
Figura 19. Variación de contenido de lignina con respecto a la edad del culmo de bambú	58
Figura 20. Balance de masa del proceso de carbonización del bambú de la especie <i>Chusquea Scandens Kunth</i>	72
Figura 21. Balance de masa del proceso de activación del carbón obtenido del bambú de la especie <i>Chusquea Scandens Kunth</i>	73

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Especies de Bambúes existentes en Colombia	26
Tabla 2. Convenciones de la figura 14.	48
Tabla 3. Convenciones de la figura 15.	51
Tabla 4. Análisis químico de las principales especies de bambú maderables	57
Tabla 5. Análisis elemental de dos especies de bambú de diferentes edades	59
Tabla 6. Calidad de la broza vegetal de <i>Chusquea Ramosissima</i> y <i>socorea bompandii</i> . Composición química (% peso seco).	61
Tabla 7. Porcentaje de carbono elemental en algunas especies de bambú	62
Tabla 8. Resultado de análisis inmediato de bambú de la especie <i>Chusquea Scandens Kunth</i>	63
Tabla 9. Caracterización de materia prima para producción de carbón activado.	64
Tabla 10. Temperaturas establecidas de temperatura (°C) y tiempo (min) para cada una de las muestras a carbonizar.	65
Tabla 11. Temperaturas establecidas de temperatura (°C) y tiempo (min) para cada una de las muestras a activar.	67
Tabla 12. Numero de yodo obtenido por muestra de carbón activado.	68
Tabla 13. Índice de azul de metileno.	69
Tabla 14. Densidad aparente de las muestras de carbón activado	69
Tabla 15. Condiciones de temperatura y tiempo adecuadas para el proceso de carbonización de bambú de la especie <i>Chusquea scandens Kunth</i> .	70
Tabla 16. Condiciones de temperatura y tiempo adecuadas para el proceso de activación de carbón de bambú de la especie <i>Chusquea scandens Kunth</i> .	71
Tabla 17. Evaluación del rendimiento para el proceso de carbonización de bambú de la especie <i>Chusquea scandens Kunth</i> .	72
Tabla 18. Evacuación del rendimiento para el proceso de activación de carbón de bambú de la especie <i>Chusquea scandens Kunth</i> .	74
Tabla 19. Datos de balance de masa para el proceso de carbonización de bambú de la especie <i>Chusquea Scandens Kunth</i>	75
Tabla 20. Datos de balance de masa para el proceso de activación de carbón de bambú de la especie <i>Chusquea Scandens Kunth</i>	76
Tabla 21. Inversiones Fijas.	76
Tabla 22. Consumo materia Prima. (Pesos colombianos COP)	77
Tabla 23. Monto salarial mano de obra directa por año teniendo en cuenta tres (3) operarios base.	77
Tabla 24. Materiales Indirectos (pesos colombianos COP)	78
Tabla 25. Mano de obra Indirecta por año	
Tabla 26. Consumo por servicios de agua y energía (pesos colombianos COP)	78
Tabla 27. Gastos de materiales Indirectos (pesos colombianos COP)	
Tabla 28. Costos totales (pesos colombianos COP) calculados para una (1) tonelada de producción.	78
Tabla 29. Precio en dólares americanos por una (1) tonelada de carbón activado de bambú	79

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Grafica 1. Variación de la temperatura con respecto al contenido de carbono fijo en muestras de carbón de bambú	63
Grafico 2. Variación de la capacidad de adsorción de los carbones activados con respecto a la temperatura de activación.	66
Grafico 3. Densidad aparente de las muestras de carbón activado.	68

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Porcentaje de humedad.	45
Ecuación 2. Porcentaje de pérdida de peso	45
Ecuación 3. Contenido de material volátil en la muestra	45
Ecuación 4. Contenido de cenizas en la muestra	46
Ecuación 5. Contenido de carbono fijo.	46
Ecuación 6. Cantidad de yodo adsorbido por gramo de carbón	53
Ecuación 7. Normalidad de residuo filtrado.	53
Ecuación 8. Número de yodo.	53
Ecuación 9. Densidad aparente del carbón activado.	55
Ecuación 10. Porcentaje de humedad.	55
Ecuación 11. Ecuación de índice de azul de metileno	66
Ecuación 12. Balance de masa del proceso de obtención de carbón de bambú	72
Ecuación 13. Balance de masa del proceso de obtención de carbón de bambú	73

ABREVIATURAS

%	Porcentaje
°C	Grados Celsius
nm	Nanómetros
cm	Centímetros
m	Metros
msnm	Metros sobre el nivel del mar
NTC	Norma técnica colombiana
ASTM	American Society of Testing Materials
%H	Humedad
%C	Cenizas
%Cf	Carbono fijo
%MV	Material volátil
Kcal	Kilocalorías
DRX	Difractograma de rayos X
Min	Minutos
H	Horas
mL	Mililitros
g	Gramos
m²	Metros cuadrados

GLOSARIO

ACTIVACIÓN FÍSICA: proceso termoquímico que desarrolla, la pirolisis y la posterior reacción de pirolisis con una atmósfera de gases oxidantes como vapor de agua, CO₂ o mezcla de estos a una temperatura entre 800°C y 1000°C para extraer átomos de carbono de la estructura y favorecer la formación de poros en el material carbonoso.

ACTIVACIÓN QUÍMICA: la activación química solo involucra un paso, ya que se usan sustancias químicas como ZnCl₂, H₃PO₄, KOH o K₂CO₃, que modifican el proceso de carbonización. Para este, la biomasa se impregna con dichas sustancias y posteriormente es carbonizada a temperaturas entre 400°C y 900°C.

ADSORCIÓN: fenómeno por el cual un sólido o un líquido atraen y retiene en su superficie gases, vapores, líquidos o cuerpos disueltos.

BAMBUISOIDEAE: es el nombre de una subfamilia de plantas que pertenecen a la familia de las poáceas o gramíneas, una de las familias botánicas más extensas y reconocidas por su rápido crecimiento. Cuando el culmo es leñoso (una caña) su nombre vulgar es bambú. La tribu Arundinarieae es conocida como "los bambúes leñosos de climas templados", la tribu Bambuseae contiene "los bambúes leñosos de clima tropical", y Olyreae es la tribu de "bambúes herbáceos".

CARBÓN: material combustible sólido, frágil y poroso con un alto contenido en carbono (del orden del 98 %). Se produce por calentamiento de madera y residuos vegetales, hasta temperaturas que oscilan entre 400 y 700 °C, en ausencia de aire.

CARBÓN ACTIVADO: carbón activo es un término genérico que describe una familia de adsorbentes carbonáceos altamente cristalinos y con una porosidad interna altamente desarrollada.

CHUSQUEA SCANDENS KUNTH: plantas que suele formar extensas colonias, con cañas hasta de 7 m de largo y 1,5-3 cm. de diámetro, entrenudos sólidos; hojas hasta de 18 cm de largo y 1-2, 5 cm. de ancho, pequeñas en las ramificaciones.

CULMO: bambú obtenido de bosques naturales dominados por esta especie y localizado en dos sitios con condiciones ecológicas diferentes, fueron evaluados para determinar cambios en propiedades fisicomecánicas y lignina.

ESPIGUILLA: es un tipo de inflorescencia que crece en ramificación caracterizándose porque las flores más jóvenes aparecen en el principio de la espiga mientras que las más desarrolladas se encuentran en la base de la espiga.

INFLORESCENCIA: se denomina al conjunto de flores que crecen en conjunto desde una misma ramificación

LINEA NODAL: es una característica intrínseca de las plantas herbáceas, ya que poseen un anillo en el tallo por el cual se forman las yemas y así dar paso a las ramas.

NEMATICIDA: es un tipo de plaguicida especial para exterminar con las especies de nematodos que se consideran plaga en un cultivo.

PERENNE: se dice que una planta es perenne cuando a vivir más de dos años.

YEMA: es el extremo joven de un tallo, por el cual la planta puede seguir creciendo, formando más tallo o normalmente ramificaciones caulinares, o ramas con hojas.

RESUMEN

Este trabajo de grado define las propiedades físicas y químicas del carbón activado obtenido del Bambú a partir de los estudios realizados a la especie *Chusquea Scandens* Kunth, Bambú herbáceo, de la familia *Poaceae* proveniente de la región de Tabio Cundinamarca, edad entre 3 a 5 años, encontrado en una altitud de 2.759 msnm, donde se realizó una evaluación de variables a partir de la obtención de carbón activado mediante activación física. El carbón activado posee una estructura porosa, y una alta área superficial que le permite ser adsorbente, presentando un diverso campo de aplicación en el sector industrial, utilizando los culmos de la planta para la carbonización, donde se tuvo en cuenta las mejores condiciones de temperatura y tiempo para compararlo a nivel de costos con carbones de otras especies de Bambú y así determinar el aprovechamiento de este material para la producción de carbón activado.

Palabras claves: Bambú, Carbón, Carbón activado, Carbonización, Activación, Licor piroleñoso.

ABSTRACT

This bachelor project defines the properties of the Bamboo from the chemical studies carried out on the *Chusquea Scandens* Kunth species, Herbaceous bamboo, of the *Poaceae* family from the Tabio region of Cundinamarca, aged between 3 to 5 years, found at an altitude of 2,759 meters above sea level. Where an evaluation of variables was carried out by obtaining activated carbon by physical activation, activated carbon has a porous structure, and a high surface area that allows it to be adsorbent, presenting a diverse field of application in the industrial sector, using the culms of the plant for carbonization, which took into account the best conditions of temperature and time to compare it at the cost level with coals of other species of Bamboo, and then to determinate the harnessing of this material for activated charcoal production

Keywords: Bamboo, Charcoal, activated carbon, carbonization, activation, pyroligneous liquor.

INTRODUCCIÓN

El bambú es considerado un producto forestal no maderable de gran importancia para el desarrollo de las economías a nivel mundial en países asiáticos donde tiene gran interés comercial debido a los beneficios que esta planta presenta. De igual forma en las últimas décadas se ha presentado interés por esta planta en América Latina, Colombia ha sido uno de ellos ya que se encuentran avances en la investigación de *Guadua Angustifolia Kunth* un tipo de Bambú nativo de países que se encuentran sobre la línea del ecuador, es el caso de Perú, Ecuador, Colombia Venezuela.

Uno de los principales usos del bambú es el carbón vegetal, el cual es reconocido por sus aplicaciones en la medicina, cosmetología y a nivel del tratamiento de aguas, en la eliminación de olores y sabores, como agente decolorante en la industria del azúcar, en máscaras para la adsorción de gases tóxicos, para eliminar o recuperar compuestos orgánicos como tintes, disolventes o compuestos orgánicos tóxicos de las aguas.¹

Igualmente, el licor piroleñoso llamado también vinagre es obtenido como co-producto de la obtención de carbón de bambú, una vez refinado puede procesarse para obtener diversos productos como aromas, antisépticos, pesticidas y preservantes, además de tener algunos otros usos como medicinales y agrícolas²

Estas características, junto con la naturaleza química de los átomos de carbono que lo conforman, le dan la propiedad de atraer y atrapar de manera preferencial ciertas moléculas de gran tamaño que entran en contacto con el carbón gracias a su alto contenido de micro, meso y macro poros y de esta manera puede retener partículas indeseadas sin problema alguno, esta propiedad se le llama adsorción; desde el punto de vista de la composición química, el carbón activado es carbón prácticamente puro, al igual que lo es el diamante, el grafito, el negro de humo, y los diversos carbones minerales, o de leña.³

De esta manera en este trabajo de grado se determinan las características óptimas para evaluar si se puede obtener carbón activado a partir del bambú de la especie *Chusquea Scandens Kunth*, especie plantada en las zonas de Cundinamarca, y al evaluarlas, analizar si es rentable a partir de los costos de producción.

¹VALDES,H, Zaror. Influencia de la composición química superficial del carbón activado en la adsorción de benzotiazoles. En: Revista Chilena de Ingeniería. Chile. Septiembre, 2010 vol.18, no.1. p.38-43. ISSN 0718-3305

² MEJÍA GALLÓN, Amanda Inés, *et al.* Identificación de compuestos volátiles del vinagre de *Guadua angustifolia Kunth*.(guadua). En: *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 2011, vol. 16, no 2, p. 190-201. ISSN 1028-4796

³ TECHNOLOGIES GROUP, Water Global. Carbon activado granular. MéxicoD.F. [en línea]. Disponible en: <http://www.ciberteca.net/equipos-para-purificadoras-y-embotelladoras-de-agua-purificada-y-mineral/medios-filtrantes-de-filtos/carbon-activado.htm>

Dicho proyecto presenta una metodología de desarrollo del proceso la cual se divide en dos fases, la primera fase teórica define la selección del bambú según sus características físicas, composición química y edad de la planta, para obtener una mayor eficiencia en el proceso de carbonización; la fase experimental, que define las condiciones de carbonización y activación con el fin de obtener un carbón activado proveniente del bambú *Chusquea Scandens Kunth*, donde, al finalizar esta segunda fase se determina la eficiencia del carbón activado a partir de una serie de pruebas descritas por la norma técnica colombiana 4467. Productos químicos industriales, métodos de ensayo. Para luego pasar a la parte financiera en donde se habla de costos directos e indirectos de obtener carbón activado de la especie de bambú anteriormente mencionada, llegando a la conclusión de un haber evaluado un carbón activado con potencial en competencia dentro del mercado. A través de esta investigación se encontraron algunas limitaciones, debido a pocos referentes investigativos de esta planta en América, la mayor parte de la información fue reconocida de autores en países asiáticos, ya que han sido pocas las opciones institucionales interesadas en patrocinar este tipo de investigación.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la obtención de carbón activado mediante activación física utilizando bambú de la especie *Chusquea Scandens Kunth*.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar el bambú según su maduración para la obtención del carbón activado.
- Establecer las condiciones adecuadas de temperatura y tiempo de residencia en las etapas de carbonización y activación.
- Determinar las características del carbón activado obtenido del bambú.
- Establecer las especificaciones técnicas del proceso de obtención de carbón activado.
- Realizar un análisis de costos del proceso de obtención de carbón activado proveniente del bambú *chusquea scandens Kunth*.

1. MARCO TEÓRICO

El Bambú es una planta que presenta características importantes a nivel forestal e industrial, es conocido a nivel mundial como una planta con características muy particulares, y por esto se han realizado investigaciones acerca de los beneficios integrales que esta planta presenta sobre todo en países como Japón, Tailandia y China que son países en los cuales abunda esta planta.

Para Colombia el Bambú cuenta con algunos avances científicos que son de aporte en la ciencia, y puede ser de utilidad en regiones donde se destaca su producción como el Valle del Cauca, la zona del Eje Cafetero y Cundinamarca. Es catalogada como una gramínea que a través de los años ha prestado grandes beneficios para el hombre, presentando este reconocimiento en países desarrollados como Japón, China, Singapur, entre otros; aunque en Latinoamérica, ha iniciado estudios con esta especie, se han conseguido avances significativos, a nivel de la construcción sostenible, clasificación taxonómica, investigación Biológica e industrial en países como: Brasil, Chile, Perú, México y Colombia.

1.1 CONTEXTO HISTÓRICO DEL BAMBÚ

El Bambú nativo de China y sus usos datan de tiempos ancestrales. Desde ese entonces el bambú juega un rol importante dentro de la cultura china, el uso data de los tiempos neolíticos desde 12.000-2.000 A.C siendo usado en construcciones en armas y cestas, en la creación de utensilios y herramientas de trabajo, se sabe también que en la cultura asiática regularmente comían brotes de bambú como parte de su dieta. Durante la dinastía Tang (618-907) se utilizó el bambú para preservar el té, mientras que la última dinastía Song (960-1.279) fue el primer gobierno en emitir papel impreso.⁴ Actualmente los brotes de bambú son un producto popular de la cocina asiática y uno de los más rentables de la cadena del Bambú en China donde se producen 5 millones de toneladas de brotes entre 1990 y 2006, de los cuales el 60% se venden a EEUU y Japón.⁵

1.2 DESCRIPCIÓN Y MORFOLOGÍA DEL BAMBÚ

El bambú es una hierba perenne, gigante, que pertenece al grupo de las angiospermas, del orden de las monocotiledóneas, Se clasifica en dos grandes grupos:

- Bambú leñoso: se encuentra especialmente en la cordillera de los Andes observándose una mayor concentración de especies entre los 2.000-3.000 metros sobre el nivel del mar. Por debajo de los 1.000 metros de altitud.

⁴ FARRELLY, David. The Book of Bamboo: A comprehensive guide to this remarkable plant, its uses and its history. 1 ed. Washington: Ed. Springer International Publishing. 2015.

⁵ MEJIA, Amanda, *et al.* Plantas Del Género Bambusa: Importancia Y Aplicaciones En La Industria Farmacéutica, Cosmética Y Alimentaria. En: Rev Vitae. Mayo, 2009.vol.16, no 3, p.397.

- Bambú herbáceo: de la familia *Poaceae*, Para los autores el cultivo de bambú, por su crecimiento radicular, tiene efectos benéficos en el suelo, como evitar o detener la erosión, e incrementa la retención de agua en el subsuelo; además, se ha reportado su gran potencial como captador del dióxido de carbono atmosférico.⁶

Según Londoño en el mundo existe un total de 90 géneros, 1.100 especies, distribuidas desde los 51° de latitud Norte (Japón) hasta los 47° de latitud Sur (Chile) y desde el nivel del mar hasta los 4.300 metros de altura. Los bambúes prefieren los hábitats húmedos de las selvas nubladas y selvas bajas tropicales, aunque algunos crecen en hábitats secos. En América, existen 41 géneros y 451 especies, casi la mitad de la diversidad mundial, los cuales se distribuyen desde los Estados Unidos, hasta el sur de Chile, con la especie *Chusquea Culeou*. En América latina se reconoce la "mata littoranea" del sur de Bahía, Brasil con presencia del 48% (22 géneros) de todos los géneros americanos, cinco (5) de los cuales son endémicos. La diversidad de esta planta se encuentra en la cordillera de los Andes desde Venezuela hasta Bolivia, Taxonómicamente los bambúes pertenecen a la familia *Poaceae* y a la subfamilia *Bambusoideae*, se cataloga como una especie que habita las montañas, entre 2.000-3.000 metros sobre el nivel del mar. En la Región andina, esta especie se encuentra entre los 2.000-3.000 metros.⁷ La especie *Chusquea* sobresale por sus excelentes propiedades físicas, mecánicas y por el tamaño de sus culmos que pueden alcanzar hasta 8 metros de altura con un diámetro de 1.5 a 5 centímetros. En Colombia existen especies plantadas desde los 0 metros hasta los 3.000 metros de altura, como se evidencia en la tabla 1.

⁶ Ibid. p. 398.

⁷ COLOMBIA. LONDOÑO, Ximena. morfología, Taxonomía, anatomía silvicultura y usos de los bambúes del Nuevo Mundo. *Maestría en Construcción. Módulo Guadua, Arquitectura. En: Rev. Módulo Guadua, Arquitectura. Agosto, 2002. p.12.*

Tabla 1. Especies de Bambúes existentes en Colombia.

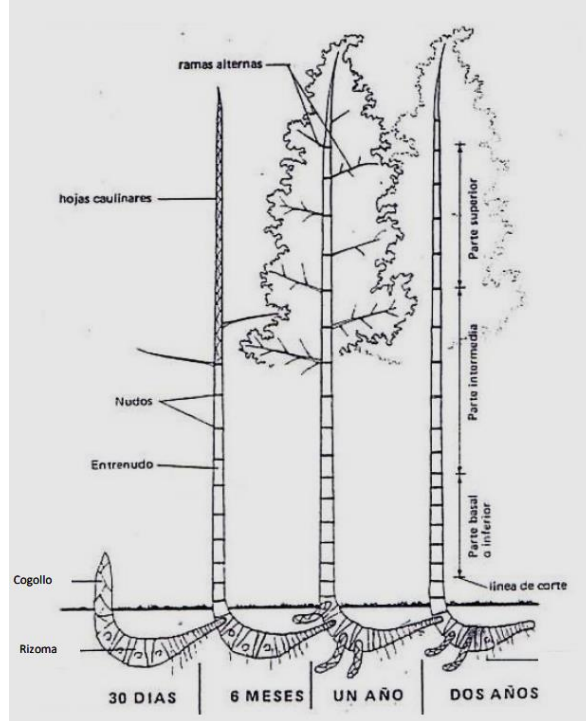
Altitud (m)	Especies	Hábitat
0-500	<i>Guadua amplexifolia</i> , <i>G. macrospiculata</i> , <i>G. angustifolia</i> <i>Rhipidocladum racemiflorum</i>	Bosque seco tropical a orilla de ríos y quebradas; bosque de galería; bosque montano y montano bajo; valle interandino y selva amazónica.
500 - 1500	<i>G. angustifolia</i> , <i>R. racemiflorum</i> <i>Otatea fimbriata</i>	Bosque montano y montano bajo; valle interandino húmedo y seco
1500 - 2000	<i>G. angustifolia</i>	Bosque montano, a orilla de ríos y quebradas; valle interandino.
2000 - 2500	<i>R. harmonicum</i> , <i>R. geminatum</i> <i>Chusquea antioquiensis</i> , <i>C. subulata</i>	Bosque montano y montano alto.
2500 - 3000	<i>Aulonemia quek o</i> , <i>C. subulata</i> , <i>R. longispiculatum</i> , <i>R. geminatum</i>	Bosque montano alto.

Fuente: LONDOÑO, Ximena, 1. Distribución altitudinal de las especies de bambúes prioritarias en Colombia. Colombia: Reseña Científica. 2011.p.145.

1.3 ESTRUCTURA DEL BAMBÚ

Los bambúes se caracterizan por tener la misma composición estructural, y esta clasificación se propone con el objetivo de caracterizarlo en términos taxonómicos y también para definir los diferentes usos para su aprovechamiento como material, ya sea de uso diario, para construcción, o bien, para transformación y producción. Se puede observar que en la figura 1. Se clasifican las partes principales de un bambú leñoso, el cual la parte más utilizada para su aprovechamiento es el tallo, o mejor llamado, el culmo que se compone por los nudos y entrenudos que le otorgan esa particular rigidez de la cual se caracteriza del bambú.

Figura 1. Estructura de bambú según su edad.



Fuente: MARTINEZ, Samuel. Bambú como material estructural: generalidades, aplicaciones y modernización de una estructura tipo. Universidad politécnica de Valencia. España. 2015. p.5.

1.3.1 Rizoma. Presenta un eje segmentado y subterráneo que constituye la estructura de soporte de la planta y es responsable de la absorción de nutrientes, es subterráneo y se caracteriza por la presencia de yemas. La especie *Chusquea* posee un rizoma central donde se desprenden varias ramificaciones que dan origen a los diferentes culmos como se observa en la figura 2.

Figura 2. Rizoma de *Chusquea Scandens* Kunth



Fuente: elaboración propia

1.3.2 Culmo o tallo. Los tallos son el soporte de toda la planta, conforma todo el cuerpo de ella, son leñosos y está conformado por nudos y entre nudos. Se clasifica según su estado de madurez en: brotes nuevos, culmos jóvenes, culmos maduros y culmos secos, su estructura desde el suelo es recto y ligeramente arqueado en la punta, como se observa en la figura 3.

Figura 3. Patrón de crecimiento de la yema y brotes nuevos



Fuente: CHINESE ACADEMY OF FORESTRY. Bamboo A Feasible Biomass Energy. [diapositivas]. Hangzhou, 2018. 29 diapositivas, color, 26 min, sin sonido

1.3.3 Follaje. Las ramas se originan en la línea nodal con más de 100 ramas por nudo, la ramificación se puede encontrar cuando emerge a través de la base de la hoja caulinar como ocurre en la casi todas las especies de *Chusquea*.⁸ El follaje está conformado por hojas con apéndices como aurículas especialmente en las

⁸ COLOMBIA. LONDOÑO, Ximena. morfología, Taxonomía, anatomía silvicultura y usos de los bambúes del Nuevo Mundo. *Maestría en Construcción. Módulo Guadua, Arquitectura. En: Rev. Módulo Guadua, Arquitectura. Agosto, 2002. p.4.*

subfamilias *Bambusoideae*. Según McClure (1966) citado por Londoño, la inflorescencia de los bambúes se presenta como un eje o un sistema de ejes (ramas asociadas), que emergen de un eje común llamado raquis primario. Tanto el raquis primario como los demás ejes finaliza en una espiguilla, la longitud del ciclo de floración varía en cada especie, con un rango de fluctuación entre 3-60 años, después de florecer y producir semillas, el culmo se seca, la planta se debilita y muere con el rizoma, la floración puede darse en grandes manchas aisladas como sucede con *Chusquea tessellata*. La longitud del ciclo de floración es irregular, puede ser anual, o presentar intervalos mayores y puede presentar floración esporádica donde la planta se torna de un color amarillento con emisión de brotes nuevos, aunque no se conoce con exactitud la forma de los frutos, algunos autores precisan que la mayoría de los frutos de los bambúes son de tipo cariopsis con pericarpio seco delgado, y tiene la forma de un grano de trigo o de arroz; existen unos pocos géneros con pericarpio carnosos.⁹

Figura 4. Hojas de Bambú



Fuente: CHINESE ACADEMY OF FORESTRY. Bamboo A Feasible Biomass Energy. [Diapositivas]. Hangzhou, 2018. 29 diapositivas, color, 26 min, sin sonido

El Bambú *Chusquea* es una especie que reúne dos 2 géneros, con 155 especies. *Chusquea* y *Neurolepis* esta se encuentra plantada desde México hasta Argentina y Chile, con algunas especies en Venezuela, ambos géneros habitan las selvas húmedas Andinas, desde los 2.000 metros hasta los 4.300 metros de altura, esta planta se caracteriza por la presencia de múltiples yemas en la región nodal del tallo, y los culmos pueden medir hasta 18 metros de altura y 6 centímetros de diámetro, Los culmos de la especie *Chusquea* son utilizados por las comunidades de clima frío para la construcción de sus viviendas, utilizando el sistema conocido como “bahareque”, y como poder calorífico en las cocinas, el follaje es utilizado para alimento de animales; para los indígenas Arahucos de la Sierra Nevada de Santa

⁹MCCLURE, F. The bamboo: A fresh perspective. Citado por LONDOÑO, Ximena. Distribución, morfología, taxonomía, anatomía, silvicultura y usos de los bambúes del Nuevo Mundo. {En línea}. Colombia: *Universidad Nacional de Colombia*.2002, p.5. Disponible en <http://www.hof-landlust.de/scb/taller.html>

Marta en Colombia, este bambú es muy importante, es utilizado en sus ceremonias religiosas y en la construcción de viviendas y templos.¹⁰

Figura 5. Bambú *Dendroclaurus Maximuslamina* originaria China – *Bambusa Vulgaris* asiática



Fuente: elaboración propia

Figura 6. Bambú *Chusquea Scandens* Kunth, Tabio-Cundinamarca, Colombia.



Fuente: elaboración propia

1.4 SIEMBRA

La mayoría de los bambúes se pueden cultivar fácilmente según el objetivo de uso que se tiene planeado, si es a nivel comercial, conservacionista u ornamental. Cuando los fines se utilizan con un propósito comercial se recomienda realizar la siembra a distancias amplias entre surcos, con el fin de lograr una mayor incidencia

¹⁰ FONDO DE FOMENTO AL DESARROLLO CIENTIFICO Y TECNOLOGICO. Carbón de Bambú y Productos Derivados, Desarrollo Tecnológico y Comercial. Proyecto Fondef de Investigación y desarrollo.,2008. Copia No. 1.

de los rayos solares sobre la planta, sin embargo, lo ideal sería realizar la siembra entre surcos de 6 a 10 metros y distancias entre plantas de 3 a 5 metros. Cuando el fin es de conservación la siembra se debe llevar a cabo a una distancia de 4 o 5 metros entre surco y de 2 o 3 metros entre planta.¹¹ Las condiciones climáticas en las que crece específicamente en Colombia es la región andina de piso térmico frío y páramo.

1.5 UTILIDAD DEL BAMBÚ

Teniendo en cuenta la oportunidad de formación en la República Popular de China, Hangzhou, Provincia de Zhejiang en el año 2018, en el curso llamado “*Training course on Bamboo Technologies for the Belt and Road countries*” patrocinado por el Ministerio de comercio y organizado por el centro de investigación nacional de bambú de China por sus siglas en inglés (CBRC), se reconoce las utilidades del bambú según sus propiedades en el aprovechamiento a partir de:

1.5.1 Fibra de Bambú. En investigaciones recientes se conocen nuevos usos y se han diseñado nuevos productos de alto valor agregado en diferentes sectores industriales, especialmente el farmacéutico, el cosmético y el alimentario. Los nuevos productos atienden especialmente a las propiedades medicinales de sus subproductos, como el carbón y el vinagre de bambú, en los compuestos activos contenidos en las hojas de bambú o en las propiedades nutraceuticas de los bambúes comestibles. En los países asiáticos lo utilizan en la elaboración de papel, textiles en prendas de vestir, cosméticos, revestimientos para vehículos, tapices, actualmente se adelantan investigaciones en el reforzamiento de matrices poliméricas con fibra de Bambú, dando paso a la elaboración de materiales innovadores, dichas fibras naturales son utilizadas en paneles como tableros de partículas, fibras de aislamiento con un material aglutinante orgánico como la lignina y el tanino.¹² “Las fibras naturales pueden ser usadas con resinas sintéticas termoestables, termoplásticas y elastoméricas, además se pueden combinar con polímeros naturales como lignina y hemicelulosa resultando un compuesto totalmente biodegradable.”¹³

Debido a que la fibra de Bambú parte de la pared del culmo esta se encuentra formada por células de parénquima representando el 50% de volumen de la planta, contiene haces vasculares que también se comportan como tejidos conductores representados por un 10% y el 40% lo representan las fibras. Los haces vasculares

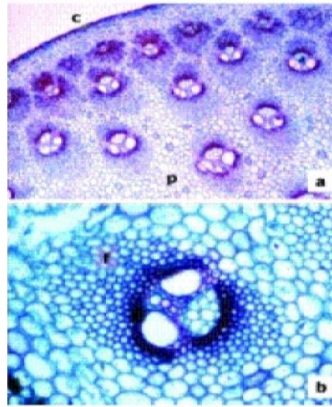
¹¹ LONDOÑO.Op.cit.,p.25.

¹² VALAREZO JARAMILLO, Luis. obtención experimental de un material biocompuesto a base de una matriz polimérica y reforzada con fibras naturales de guadua angustifolia proveniente del ecuador. Trabajo de grado profesional en Ingeniería Mecánica. Ecuador. Universidad Politécnica Salesiana. Facultad de Ingeniería. 2013.p.4.

¹³ Ibid., p4

formados por células de parénquima, con tubos de xilema y floema rodeados por fibras, como se observa en la figura 7.

Figura 7. Sección de la pared del culmo del Bambú



Fuente: VALAREZO, Luis. Obtención experimental de un material Biocompuesto a base de una matriz polimérica y reforzada con fibras naturales de guadua *Angustifolia* proveniente del Ecuador. Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana. 2013.

1.5.2 Madera. La utilización de la madera del Bambú se presenta como materiales de madera alternativos utilizados en países asiáticos, son útiles para la construcción cuya importancia resalta en Colombia las construcciones sostenibles del Arquitecto Simón Vélez, debido a las propiedades físicas que esta planta posee, ya que es un material ligero con propiedades de flexibilidad y sismo resistencia, utilizado en estructuras civiles, en países como Asia, África y Latinoamérica donde se destacan investigadores que han avanzado en estudios con grandes beneficios para las comunidades debido a la producción de productos homogéneos como moldes para molduras de hormigón en construcción.

La madera es utilizada en productos para el hogar, incluyendo instrumentos agrícolas, en utilización de artesanías como muebles de excelente calidad y diseño. Otro de los beneficios de la madera se encuentra en el Carbón de leña más de 200 especies que sustituye el carbón vegetal, donde en algunos lugares como en China es utilizado en las cocinas para uso doméstico, donde consumen los brotes de bambú debido a que contienen alto contenido de fibra, además de ser utilizado para potabilizar el agua.¹⁴

¹⁴ CHAOWANA Pannipa. Bamboo: An Alternative Raw Material for Wood and Wood-Based Composites. En: Rev. Journal of Materials Science Research. Marzo, 2013.vol. 2, No. 2, p. 90-102

1.6 ESPECIE DE BAMBÚ CHUSQUEA SCANDENS KUNTH

Esta especie posee características debido a las condiciones vegetativas de la planta como es el caso de la porosidad y alta superficie específica en sus paredes interiores; y la sustentabilidad que esta posee a nivel comercial ya que en países asiáticos la utilizan para fabricación de carbones activados, o sin activar orientados a funciones de adsorción. Carbón de bambú producido a nivel operativo en horno metálico, con mayor capacidad de adsorción de gases y fluidos. Es además utilizado en empresas mineras, industria de alimentos, utilizada para la elaboración de filtros industriales, en purificación de aguas, procesos de producción limpia y usos domésticos; el carbón activado de bambú se destaca por su disponibilidad y eficiencia al contar con una eficiente producción de biomasa.¹⁵

1.7 CARBÓN PROVENIENTE DEL BAMBÚ

El carbón se origina por la descomposición de vegetales terrestres que se acumulan en zonas pantanosas, lagunares o marinas. El carbón es un mineral de origen orgánico constituido básicamente por carbono. Su formación es el resultado de la condensación gradual de la materia de plantas parcialmente descompuestas a lo largo de millones de años. Las plantas al descomponerse forman una capa llamada turba.¹⁶

En la agricultura, controla el crecimiento de microorganismos en el suelo y complementa la nutrición orgánica en los cultivos, el carbón de bambú puede fortalecer la vitalidad del suelo ya que se considera un buen modificado de suelo. En la industria química, el carbón de bambú se puede utilizar como materia prima para el carbón activado. Gracias a la estructura especial de microporos del bambú, tiene una gran capacidad de absorción después de la carbonización. El carbón de bambú también tiene muchos usos en medicina y cuidado de la salud. Las almohadas y el colchón de cama hechos de carbón de bambú tienen efectos para aliviar la tensión en las personas y eliminar el dolor de espalda, también se puede usar como desodorante y agente antibacteriano.¹⁷

En la protección del medio ambiente, debido a su buena capacidad de absorción, se puede utilizar como purificador de agua, protege contra radiaciones de carácter electromagnético y también se usa como un agente de adsorción ante sustancias químicas peligrosas. Los usos del carbón activo de bambú son mucho más amplios: se puede usar como purificador de aire. El carbón activo de bambú puede expulsar

¹⁵ FONDO DE FOMENTO AL DESARROLLO CIENTIFICO Y TECNOLOGICO. Op.cit., p.11.

¹⁶ AGUAPEDIA. Trabajo de grado Máster en Ingeniería del Agua. Manual del Carbón Activado. España: Escuela Politécnica Superior Universidad de Sevilla.

¹⁷ YANG, Hee Jin. Antifungal activity of nano and micro charcoal particle polymers *against Paecilomyces Variosii, Trichoderma Virens and Chaetomium Globosum*, En: New biotechnology Journal, Myongji university, Yonjin, Corea del sur. Vol. 33. No. 1. Agosto 2016 p.55.

el gas nocivo durante el proceso de producción de semiconductores. Se puede utilizar para purificar altamente el agua. También se usa ampliamente en la industria alimentaria, en la elaboración de cerveza y la fabricación de azúcar refinada, y también en muchos otros campos, se puede usar como catalizador o soporte de catalizador.

El carbón activo de bambú también juega un papel importante en la medicina. Los filtros de cigarrillo que contienen carbón, pueden absorber una gran cantidad de sustancias nocivas como la nicotina.¹⁸

El carbón activado es derivado generalmente de materiales naturales tales como la madera, turba, entre otros, por lo tanto, aún se le considera un proceso costoso. Las materias primas deben contener elevado porcentaje de carbono en su estructura química, bajo contenido de cenizas luego del llevarlo a procesos de carbonización. El carbón activado posee una estructura porosa, y una alta área superficial que le permite ser adsorbente, ya que las moléculas son acumuladas dentro de los poros. El proceso de adsorción del carbón activado, consiste en la unión de una sustancia gaseosa o líquida en la superficie de una matriz sólida, como consecuencia de fuerzas de Van der Waals.¹⁹

1.7.1 Propiedades fisicoquímicas del carbón activado. El carbón activado como material carbonoso y poroso contiene gases oxidantes, y algunas veces con la adición de productos químicos (por ejemplo, ácido fosfórico, cloruro de zinc o hidróxido potásico) durante y después de la carbonización para aumentar la porosidad. La superficie específica y las dimensiones de los poros dependen del precursor y de las condiciones de los procesos de carbonización y activación utilizados. Los tamaños de los poros van desde los más pequeños, llamados microporos (hasta 2,0 nm), hasta los mesoporos (de 2,0 a 50 nm) y macroporos (mayores de 50 nm). La mayor parte de la adsorción tiene lugar en los microporos, responsables de más del 90% de la superficie específica.

La Universidad de Chile en el año 2007 presenta una experiencia de carbón activado donde se especifica que el carbón activado presenta en su estructura átomos de carbono y además, grupos funcionales, principalmente de oxígeno y nitrógeno, y componentes inorgánicos responsables de las cenizas, todos ellos con un efecto importante en los procesos de adsorción, dichos grupos funcionales se forman durante el proceso de activación por interacción de los radicales libres de la superficie del carbón con átomos tales como oxígeno y nitrógeno que pueden en parte provenir del precursor o de la atmósfera; la principal fuente de oxígeno en el carbón activado es la interacción con gases oxidantes en el proceso de activación

¹⁸

¹⁹ FONDO DE FOMENTO AL DESARROLLO CIENTIFICO Y TECNOLOGICO. Op.cit., p.10.

utilizándose como agentes oxidantes oxígeno, dióxido de carbono, vapor de agua siendo este el más común.²⁰

Dicha investigación especifica que los carbones activados pueden presentar superficies específicas del orden de 500 m²/g a 2000 m²/g e incluso llegar a los 3000 m²/g. Los elevados valores de superficie específica se deben a la porosidad que presentan los materiales carbonosos. En principio, se podría creer que a mayor superficie específica mejores serán las características como adsorbente del carbón activado, puesto que habría un mayor número de centros para adsorber el adsorbato. Sin embargo, esto no siempre es cierto ya que dependiendo del tamaño de las moléculas del adsorbato puede suceder que éstas sean mayores que algunos de los poros y, por lo tanto, no toda la superficie sea accesible a dichas moléculas. Por otro lado, también se debe tener en cuenta la geometría del poro y la del adsorbato. Así, por ejemplo, algunas moléculas pueden penetrar en poros con geometría del “tipo rendija” y no hacerlo en poros de dimensiones similares y geometría distinta.²¹

Como resultados de esta investigación se concluye que: existe un potencial en el país para la fabricación de carbón activado de buena calidad, aplicable a una gran cantidad de industrias, principalmente en la minería de oro y en el tratamiento de líquidos residuales. En Chile existe disponibilidad de materia prima suficiente, adecuada y a bajo costo para la fabricación de distintos tipos de carbones activados. Además, se observó que gran parte del carbón activado consumido en Chile es importado, representando una cantidad cercana al 70%, debido a que existe una restricción de capacidad ya que en Chile se cuenta con una planta de 500 toneladas anuales, lo cual se traduce en que la oferta no alcanza a cubrir la demanda interna del país,²²

1.8 PRINCIPALES USOS DEL CARBÓN ACTIVADO

Los usos del carbón activado son los siguientes:

Remoción de impurezas que le dan color, olor y sabor al agua potable y tratamiento de agua en procesos industriales, Uso médico para tratamiento de intoxicaciones agudas, recuperación de solventes, eliminación de olores en lugares cerrados, bodegas, refrigeradores, mejoramiento de olores y sabores en alimentos, evitar la maduración prematura de frutas y verduras, recuperación de oro y plata, decoloración de azúcares, mieles y caramelos, decoloración de licores, jugos, vinagres, entre otras aplicaciones.

²⁰ SOTO, Francisco. Evaluación técnico económica de una planta de carbón activado. Chile, Santiago de Chile: Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas departamento de ingeniería industrial. 2007.p.11.

²¹ Ibid.,p.12.

²² Ibid.,p. 73.

Figura 8. Carbón activado de *Chusquea Scandens Kunth*



Fuente: elaboración propia

1.9 MÉTODOS PARA OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

El Carbón activado a nivel comercial es fabricado a partir de materiales orgánicos ricos en carbono, especialmente carbón mineral, madera, huesos, cáscaras de frutas (como, por ejemplo, cáscaras de coco, de nuez y de maní), Los procesos de fabricación se pueden dividir en dos tipos: activación física o térmica y activación química.

1.9.1 Activación Física. Este proceso se lleva a cabo en dos etapas: la carbonización y la gasificación controlada del carbonizado. La carbonización es la transformación de la materia prima a carbón en la cual se eliminan elementos como el hidrógeno y el oxígeno, para dar lugar a un esqueleto carbonoso. Este proceso se realiza en ausencia de oxígeno a temperaturas inferiores a 700°C. En la activación el material sólido se expone a una atmósfera oxidante (oxígeno, vapor de agua, dióxido de carbono, o una mezcla de éstos) a temperaturas entre 800°C y 1000°C, eliminando productos volátiles, y aumentando el volumen de los poros y la superficie específica al oxidar parte de las moléculas de carbono. La activación es el proceso de oxidación lenta del carbón resultante por medio del cual se forman millones de poros microscópicos en la superficie del carbón.

1.9.2 Activación Química. Para este caso el material lignocelulósico como madera, se impregna con un agente activante de origen químico, como el ácido fosfórico, calentado en un horno a 500-700°C. Los químicos utilizados reducen la formación de material volátil y los alquitranes, aumentando el rendimiento en el carbono, el carbón resultante se lava profundamente para eliminar los restos del activante usado en la impregnación. Adicionalmente, estos carbones pueden ser activados térmicamente por gasificación con dióxido de carbono o vapor de agua para obtener carbones activados.²³

²³ Ibid., p.15.

1.10 ADSORCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO

Los niveles de adsorción de un carbón activado pueden ser medidos mediante los siguientes índices:

- Índice de yodo: Es el parámetro fundamental usado para caracterizar el funcionamiento del carbón activado a partir de:
 - Medida del nivel de actividad (números más grandes indican mayor grado de activación).
 - Medida del contenido de microporos: Equivalente al área de superficie del carbón activado en m²/g.
 - Medida estándar para aplicaciones en fase líquida.
- Índice azul de metileno: A través de la medida de la estructura de mesoporos.
- Densidad aparente: son densidades mayores entregan un mejor volumen de actividad y normalmente indica carbones activados de mejor calidad.
- Tamaño de partícula: Los tamaños menores proveen radios de adsorción más rápidos el cual reduce la cantidad de tiempo de contacto requerida.
- Contenido de ceniza: reduce toda la actividad del carbón activado y reduce la eficiencia de reactivación.
- Medición de isotermas: Este método es un procedimiento general para evaluar un carbón activado, donde se suministra una base común para desarrollar un procedimiento de evaluación del carbón activado en aplicación en fase líquida.²⁴

1.11 ANTECEDENTES DE LA PRODUCCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO

La mayoría de experiencias de investigación se encuentra liderada por estudios en países asiáticos, especialmente en la República Popular de China, donde a través de la revisión e literatura y la visita a este país confirma los avances técnicos tecnológicos y de innovación que se tiene en torno al aprovechamiento del Bambú. Una de las experiencias destacadas en el año 2011 se presenta en la Nanjing Forestry University, donde se realizó la carbonización del Bambú a diferentes Temperaturas que oscilaron entre 200 a 600°C y la dependencia del cambio de la hemicelulosa, celulosa y lignina, los espectros infrarrojos mostraron resultados que desdoblaron 200% de hemicelulosa en bambú. Una gran cantidad de grupos hidroxilo se rompieron mientras que la estructura neta de lignina se mantuvo estable entre 250-400°C.

Para la carbonización de bambú, se tuvo en cuenta el contenido de carbono en las cadenas alifáticas donde disminuye; y la aromatización del carbono residual se completó a una temperatura de 600°C, a medida que se incrementa la temperatura incrementa el porcentaje de carbono fijo en el proceso de carbonización.²⁵

²⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Productos químicos industriales. Carbón activado. Métodos de ensayo. NTC 4467. Bogotá D.C.: El instituto, 1998. ISBN 9789588585673. 28.p.

²⁵ ZUO SONG, Lin. *et al* Carbonization mechanism of bamboo (phyllostachys) by means of

La especie *Chusquea Scandens* Kunth, es una especie poco reconocida tanto en el mercado Nacional como en el desarrollo de investigaciones principalmente de Carbón activado, esta especie ha desarrollado en Colombia avances significativos en tono a la construcción de viviendas por sus propiedades mecánicas.

En Latinoamérica pocas investigaciones se encontraron una de ellas un proceso de investigación realizado en Chile en el año 2005, proyecto patrocinado con recursos de la Corporación Nacional Forestal y entidades asociadas como: El centro experimental forestal de la Universidad austral de Chile (CEFOR-UACH), SERVICAR Ltda. MAGA Ltda. Y la Red Internacional del Bambú y el Ratán (INBAR). El objetivo del proyecto fue Desarrollar capacidades tecnológicas, de gestión y una base de información precompetitiva, que permitiera en una fase post proyecto, promover la producción y comercialización de diferentes tipos de carbones de bambú y productos derivados de la carbonización, uno de ellos el Bambú *Chusquea*. El desarrollo del proyecto estuvo asociado a la utilización de carbones vegetales con fines de adsorción, como implementación de procesos de producción más limpia, aplicables a diferentes industrias. Como resultado de los procesos de activación de bambú autóctono de Chile, se obtuvieron carbones activados con una superficie específica de 900 m²/g, lo que corresponde a un valor ubicado dentro de los carbones vegetales activados comerciales, aun cuando este valor es factible de optimizar, con ajustes en las tasas de incorporación de vapor. Comparado con estudios en China, donde se han desarrollado una cantidad de usos comerciales para carbones de bambú, con superficies específicas en promedios que no superan los 700 m²/g.²⁶

Otro de los aspectos a resaltar en esta investigación fue la capacidad de adsorción de moléculas pesadas, como coloides y colorantes observadas en el índice de adsorción del Azul de Metileno, experiencia definida para el bambú *Chusquea*, donde se obtuvieron valores de adsorción de 385 mg/g, el cuál supera a los carbones vegetales reportados en diferentes estudios. Para el caso de índice del Yodo se obtuvo rangos de resultados de 660 a 860 mg/g., considerados también dentro de los rangos comerciales. Este amplio rango de variación brinda la posibilidad de generar carbones de diversas calidades acordes con las demandas del mercado y ajustar los costos a la producción según los requerimientos.

Un factor relevante encontrado fue la capacidad de adsorción que presenta el carbón activado en procesos que no se usan productos químicos ya que las implicaciones de este factor, son la disminución de costos del proceso por no

Fourier Transform Infrared and elemental analysis. [en línea]. En: Journal of Forestry Research, Marzo, 2003, no 14(1), p. 75-79. [Consultado 20 de septiembre de 2017]. Disponible en <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02856768>

²⁶ COMISIÓN NACIONAL DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y TECNOLOGICA. Carbón de Bambú y Productos Derivados, Desarrollo Tecnológico y Comercial. Fondo de Fomento al desarrollo científico y tecnológico. Chile: 2008.p.24.

requerir productos químicos y también favorece la demanda ya que se exigen carbones que no contengan productos químicos, principalmente en el ámbito de la agroindustria, industria de alimentos y vinos. El licor piroleñoso obtenido en el proceso de carbonización se puede clasificar también como producto libre de químicos, lo que incrementa sus posibilidades en el mercado, además suele ser muy utilizado en industria química, química farmacéutica, y en agricultura ya que se utiliza como fungicida, nematicida, preservante de maderas, antihistamínico (en la medicina oriental), en cosmética y demás beneficios aprovechados en la industria China. La captura de este licor piroleñoso utilizando dispositivos, diseñados en el proyecto, permitió capturas a nivel operativo con porcentajes cercanos al 20%, sin embargo, con pequeñas propuestas de mejoras se puede incrementar, porque a nivel de laboratorio la recuperación de vinagres fluctúa entre un 30% a 40% del peso seco de la materia prima.²⁷

Durante el desarrollo de la metodología en la captura de derivados de la carbonización, por medio de la condensación de los gases emanados, estos subproductos, tienen una amplia gama de aplicaciones en países orientales en la medicina, agricultura, cosmética entre otras áreas. En el proyecto se llevó a cabo, con resultados favorables, la aplicación del denominado “licor de Bambú”, para inmunizado de la madera.

Se concluye en este proceso que los carbones activados y sin activar de bambú autóctono de Chile, utilizados para fines principalmente de adsorción, o como combustibles, con aprovechamiento de sus derivados, representan una opción productiva que permite generar impactos positivos socioeconómicos y ambientales hacia destinos comerciales, para cañas de bambú sin restricción de calidades, aspectos que favorece un alto nivel complementado con otras alternativas productivas de cañas con calidades superiores como los tableros decorativos de bambú, o cañas de exportación.

Los resultados de producción en los ensayos específicamente con la especie *Chusquea Quilla*, se obtuvo un poder calorífico en base anhidra de 6993 KCal, por kilo, encontrándose dentro de los rangos comerciales de los carbones vegetales en Chile.²⁸

En Colombia se han realizado proyectos de investigación relacionados al desarrollo de carbón activado con gran proporción en la especie de *Guadua Angustifolia* Kunth,

²⁷ ZHANG, Huiyun. Antioxidant and antimicrobial effects of edible coating based on chitosan and bamboo vinegar in ready to cook pork chops. En: Food and Bioengineering Department Journal, Henan University of Science and Technology. Henan, China: Vol.93. Julio 2018. p.472.

²⁸ COMISIÓN NACIONAL DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y TECNOLOGICA. Carbón de Bambú y Productos Derivados, Desarrollo Tecnológico y Comercial. Fondo de Fomento al desarrollo científico y tecnológico. Chile: 2008. p.36.

donde se encuentran varias investigaciones en el Quindío, Risaralda y Valle del Cauca se resaltan las más importantes.

En la Universidad de Quindío se encuentra el proyecto “Identificación de las variables óptimas para la obtención de carbón activado a partir del precursor guadua *Angustifolia Kunth*” En este trabajo se presentan las variables óptimas encontradas para la obtención de carbón activado, identificando parámetros como: temperatura de carbonización, tiempo de carbonización, temperatura de impregnación en activante, tiempo de impregnación en activante, relación carbón vegetal-activante, temperatura de activación, tiempo de activación y tamaño de muestra, dichas condiciones reconocieron obtener la mayor capacidad de adsorción en procesos de decoloración con Azul de Metileno.

La pirolisis del proceso de carbonización que se decidió usar se llevó a cabo en un horno mufla de una entrada y una salida, el cual se acondicionó con una entrada de gas N_2 y una salida acondicionada para recuperar el licor piroleñoso, se contaba con conexión a 220V y una potencia eléctrica alrededor de 5.000W, lo cual permitió variar la temperatura interior del horno en un rango comprendido desde temperatura ambiente hasta 700°C mediante un controlador proporcional, integral y derivativo (PID) el cual estaba conectado al horno.

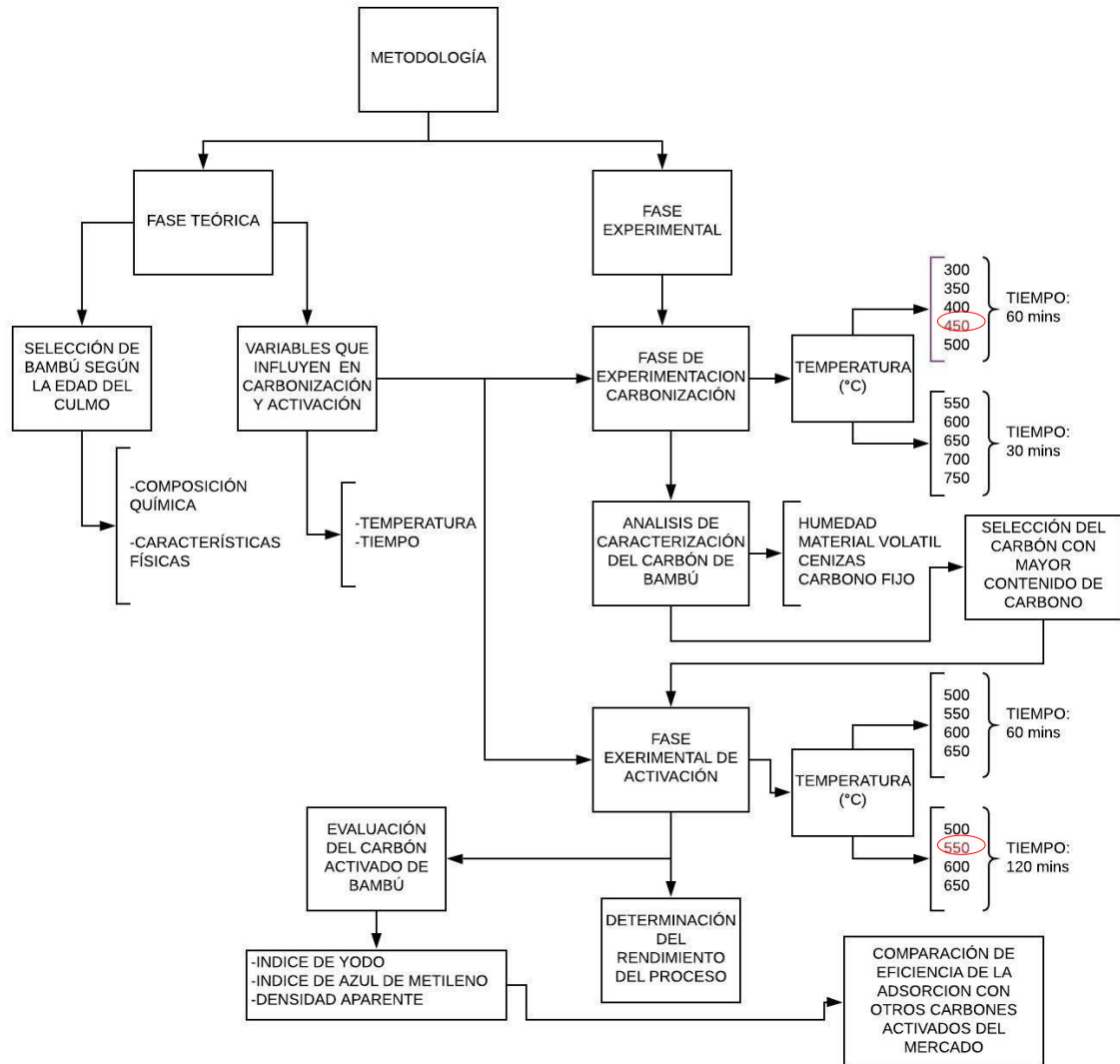
En el proceso de identificación de las variables óptimas, se realizó la caracterización de las muestras, para diferentes fases del proceso. Inicialmente, se realizaron estudios de difracción de rayos X, en muestras del culmo de la *Guadua angustifolia Kunth*, para los tres diferentes biotipos; Macana, Cebolla y Castilla, en los cuales en los espectros de DRX se observan bandas alrededor de 16° y 22°, lo cual indica una alta presencia de celulosa en la *Guadua*, los procesos de decoloración con azul de metileno, determinó la temperatura de carbonización de 300°C durante 1 hora, el tamaño de partícula debe ser menor a 180µm para la activación, la impregnación en el agente activante se debe realizar a una temperatura de 110°C durante 15 horas, encontrándose un mejor desempeño con el ácido fosfórico (H_3PO_4), en una relación de 2:1 activante: carbón y una temperatura de activación de 450°C durante 1 hora, mientras que el proceso de obtención de carbón activado requieren de un seguimiento específico, debido a que no presentaron un mejor desempeño con las condiciones encontradas.²⁹

²⁹ PRIAS BARRAGAN, Jhon, *et al.* Identificación de las variables óptimas para la obtención de carbón activado a partir del precursor guadua *ANGUSTIFOLIA KUNTH*. En: Revista Académica Colombiana de ciencias, Armenia. Junio, 2011, no. 35 (135). p.157-166. ISSN 0370-3908.

2. METODOLOGÍA

La metodología se desarrolló en una primera fase teórica y una segunda fase experimental, la cual se desencadena en las fases de experimentación de carbonización y activación, para luego dar paso a la última fase de experimentación para evaluar la capacidad de adsorción del carbón activado obtenido, tal como se muestra en la figura 9:

Figura 9. Esquema metodológico.



Fuente: elaboración propia

2.1 FASE TEÓRICA

Consistió en hacer una revisión teórica para realizar una selección cualitativa de los culmos de bambú según su edad, que sean aptos para la producción de carbón ya

que para poder desarrollar análisis cuantitativos para determinar las propiedades químicas y físicas del culmo de bambú, se necesita de material de laboratorio especializado como equipos e insumos, y no hubo respaldo por parte de instituciones empresariales o educativas a las que se le propuso realizarlo.

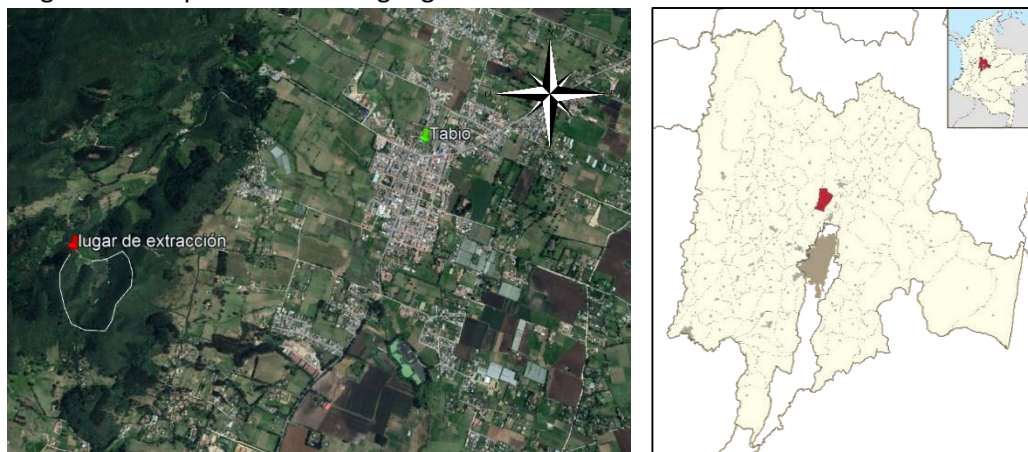
En el caso de las variables que influyen en la carbonización y activación, se determinaron tiempos y temperatura de residencia con base a la bibliografía revisada ya que estas dos variables son las que más influyen dentro del proceso de formación del carbón activado, así se pudieron establecer dichos valores dentro de los cuales se variaron con respecto a la bibliografía que determina las variables óptimas para la producción de carbón activado a partir de bambú.

2.1.1 Ubicación geográfica toma de muestra. La toma de muestra del bambú de la especie *chusquea scandens Kunth* se realizó en una plantación identificada en el municipio de Tabio ubicado en el departamento de Cundinamarca. La plantación se encuentra en un predio privado y para realizar la extracción se contó con la autorización del propietario respaldando el proyecto de investigación.

El municipio cuenta con un área total de 74.5 km², una temperatura ambiente promedio de 14°C, una altitud de 2.786 msnm y una humedad relativa de 30%, las cuales son condiciones óptimas para el crecimiento de esta especie de bambú considerado de alta montaña. El predio de donde se extrajeron las muestras de bambú se muestra en la figura 9, mediante un mapa de ubicación geográfica.

La parcela donde se realizó la extracción del material vegetal tiene un área total de 15 Hectáreas de las cuales 2,2 Hectáreas aproximadamente son de bambú, las cuales serán cortadas y puede ser viable utilizarlo como fuente de ingreso al transformarlo en un producto que sea rentable y a la vez que pueda tener demanda en el mercado.

Figura 10. Mapa de ubicación geográfica de toma de muestras



Fuente: elaboración propia

2.1.2 Bambú para extracción y corte. Con respecto a la información anterior se puede seleccionar el bambú adecuado para la producción de carbón y se procedió al corte, que fue un corte in situ, en el cual se procuró cortar desde la base con un corte transversal limpio para no astillar la corteza y de esta manera conservar la estructura del culmo.

Figura 11. Vista panorámica de la parcela de bambú *Chusquea scandens* Kunth.



Fuente: elaboración propia

Figura 12. Selección de bambú según sus características físicas.



Fuente: elaboración propia

Se extrajeron un total de 12 culmos que tuviesen la misma apariencia, que fueran verdes con tonalidades grises y amarillas, con un diámetro trasversal promedio de 3,5 cm y con una altura promedio de 7,3 metros. El bambú fue transportado desde su origen hasta las instalaciones adecuadas para su posterior experimentación.

2.2 FASE EXPERIMENTAL

2.2.1 Preparación de la biomasa para carbonización. Se acondicionó la materia prima pasados 3 días de ser cortada y se redujo el bambú en trozos para posteriormente triturarlo, surgieron más dificultades en el momento de manipularla, esto con el objeto de llevar a cabo la experimentación en base húmeda, luego se procedió a almacenar, se dejó en una zona de poca ventilación y con poca luz, esto promovió la proliferación de microorganismos y la madera pasó de un color

amarillo pálido, a un color amarillo oscuro con tonalidades cafés y expelía un mal olor, así que se optó por llevar a cabo la experimentación con la materia prima en base seca.

Después de lo observado el culmo se dejó secar a temperatura ambiente por un total de 12 días expuestos directamente al sol para eliminar la humedad y parte del contenido volátil, luego se limpiaron los culmos de bambú, se les retiró el follaje y se cortaron para una mejor manipulación, luego de eso se les pasó por una trituradora para desechos orgánicos marca TRAP, modelo TR200, ya que el horno mufla que se tenía a disposición para realizar la carbonización era de dimensiones muy reducidas y no se podía carbonizar el bambú en varas, aunque esto facilitó la medición de masa que se introducía al horno para carbonizarlo y medir su rendimiento según la temperatura que se desee usar en la carbonización.

Figura 13. Bambú seco y bambú seco triturado para carbonización



Fuente: elaboración propia

2.2.2 Análisis inmediato del bambú chusquea scandens Kunth. Se realizó un análisis inmediato para caracterizar el material vegetal que se usó en la obtención de carbón, para ello se determinaron los porcentajes de Humedad, material volátil, cenizas y carbono fijo con el fin de conocer la composición química general de la materia prima sin necesidad de realizar análisis específicos o detallados que pueden llegar a ser muy costosos.

2.2.3 Humedad. El análisis de humedad se establece según la norma ASTM D2867-99 donde se procedió a tomar 1g de la muestra de material vegetal, se coloca en un crisol de masa conocida y el material vegetal se pesó en una balanza analítica de precisión, luego se sometió a un secado gradual en un horno tipo mufla desde temperatura ambiente hasta llegar a los $110\pm 1^{\circ}\text{C}$, durante 2 horas. El contenido de humedad se calculó por diferencia de peso luego de que el crisol con la muestra seca fuera colocado en un desecador, según la ecuación descrita a continuación:

Ecuación 1. Porcentaje de humedad.

$$\%H = \left(\frac{W - A}{W} \right) * 100$$

Donde:

%H = porcentaje de humedad.

W = peso de la muestra analizada (g).

A = peso de la muestra después de secada (g).

2.2.4 Material volátil. El contenido de material volátil se desarrolló según la norma ASTM D5832-98, el cual se describe como pérdida de peso que se prueba en la muestra seca, al ser calentada en una atmosfera reductora, eso quiere decir que el material se encuentre calentando en ausencia de oxígeno, la muestra fue posteriormente enfriada, y este contenido de material volátil se calcula teniendo en cuenta el contenido de humedad del material vegetal, en donde se tomó 1 g de la muestra, se colocó en un crisol de masa conocida y se colocó en horno tipo mufla previamente calentado a una temperatura de $925 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 7 minutos, pasado este tiempo se enfrió hasta temperatura ambiente en un desecador para que no haya contacto con la humedad del ambiente y finalmente se calcula el contenido de material volátil por la diferencia de peso, se tuvo en cuenta la siguiente ecuación:

Ecuación 2. Porcentaje de pérdida de peso

$$\%PP = \frac{(B - D)}{(B - C)} * 100$$

Donde:

%PP = Porcentaje de pérdida de peso

B = Masa del crisol (g)

C = Masa del crisol con la muestra (g)

D = masa del crisol con la muestra volatilizada (g)

En el cual el contenido de material volátil se puede obtener de la siguiente ecuación:

Ecuación 3. Contenido de material volátil en la muestra

$$\%MV = E - F$$

Donde:

E = Porcentaje de pérdida de peso (%PP)

F = Porcentaje de humedad (%H)

2.2.5 Cenizas. El contenido de cenizas en la muestra de material vegetal, se logró calcular mediante la norma ASTM D2866-94 la cual determina el contenido de materia inorgánica (cenizas) en donde sea requerido, las cenizas normalmente se originan luego de que ocurre la descomposición térmica de algunos materiales bajo condiciones específicas. Para calcular el contenido de cenizas se pesó 1 g de

la muestra de bambú, el cual previamente se le haya secado para eliminar el contenido de humedad, y luego se colocó en un horno tipo mufla a 650°C durante un tiempo de 16 horas, pasado el tiempo se dejó reposar en una desecador hasta llegar a temperatura ambiente y por diferencia de peso se obtiene la cantidad de ceniza presente en la muestra, la cual se representa en porcentaje, tal como lo describe la siguiente ecuación:

Ecuación 4. Contenido de cenizas en la muestra.

$$\%C = \frac{(D - B)}{(C - B)} * 100$$

Donde:

%C = contenido de cenizas en la muestra

B = masa del crisol (g)

C = masa de crisol con la muestra (g)

D = masa del crisol con la muestra incinerada (g)

2.2.6 Contenido de carbono fijo. El contenido de carbono fijo es la parte restante del material vegetal que se carbonizó y no se volatilizó, normalmente se encuentre en los residuos que sobran en el crisol luego de realizar el proceso de pirolisis y se define como la diferencia los valores de humedad, material volátil y cenizas que se resta del 100% de la composición total, se puede expresar también según la siguiente ecuación:

Ecuación 5. Contenido de carbono fijo.

$$\%Cf = 100 - \%H - \%MV - \%C$$

Este contenido de carbono es el que se obtiene por la descomposición de la lignina en el proceso de pirolisis del bambú. El propósito es aprovechar la materia prima que se propone, generando una mayor cantidad de carbono, aparte del carbono elemental que ya contiene.

2.3 CONDICIONES DE MONTAJE PARA CARBONIZACIÓN

Inicialmente para el proceso de carbonización se utiliza nitrógeno gaseoso para garantizar una atmosfera anaerobia dentro del horno en el cual se llevó a cabo el proceso de pirolisis, se contó con un regulador de presión y un medidor de flujo CGA/580 para poder determinar la cantidad de nitrógeno gaseoso que entraba en el horno de tal forma que no se formara un flujo turbulento, también poder desalojar el oxígeno presente, y lograr tener una atmosfera controlada dentro del proceso. El horno cuenta con un controlador PID MC 5438 que permitió la manipulación de la temperatura y control de la misma, para poder llevar a cabo los análisis inmediatos previos y también controlar el tiempo y la temperatura que se utilizó en cada uno de los procesos de carbonización, este controlador cuenta con una termocupla que

rangos de medición desde 0-1150°C, y un indicador de pantalla digital en el cual muestra la temperatura de trabajo.

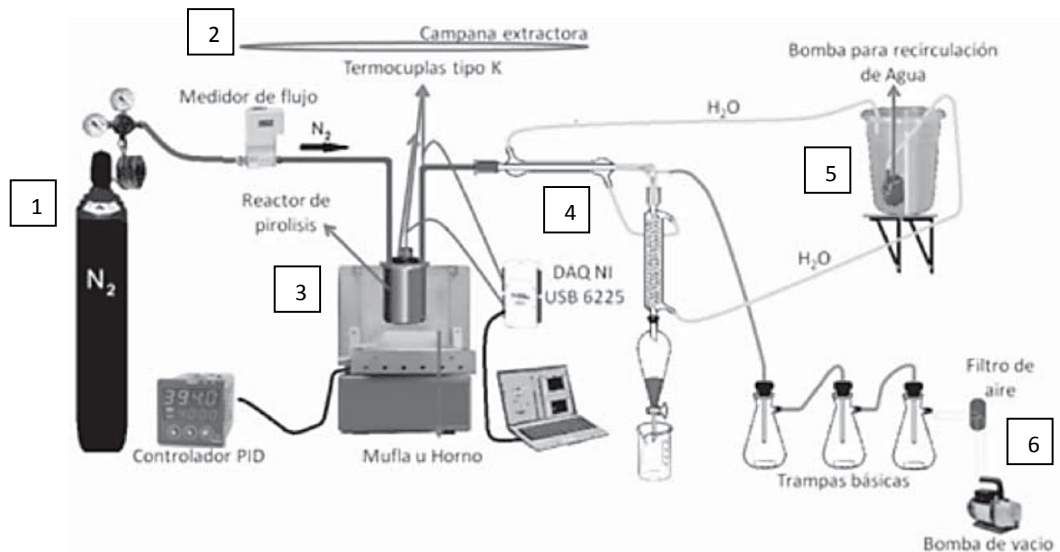
Para la obtención del licor piroleñoso se realizó el montaje de condensación, para recuperar los vapores obtenidos de la carbonización, el montaje contó con un tubo de condensación recto para reducir la temperatura de los vapores que ingresaban a este y luego seguían al tubo de condensación tipo serpentín, en donde el condensado bajaba hasta el embudo de decantación, en donde se podía recoger el licor obtenido.

El agua de enfriamiento utilizada en el proceso de condensación fue recogida y recirculada mediante una bomba sumergible marca EVANS modelo Aqua30W, la cual tiene una capacidad de 10 L/min el cual es adecuado para poder hacer una recirculación en el sistema de condensación para no generar mayores pérdidas de agua.

Por último, se colocó una trampa de vacío compuesta por tres matraces de Erlenmeyer que están conectados a una bomba de vacío marca WELCH 2019B-01, la cual fue instalada con el propósito de recoger algunos subproductos como alquitrán residual y también para evitar presurizaciones dentro del sistema.

Se propuso el montaje del proceso de carbonización a escala laboratorio para la producción de carbón activado a partir de la figura 14.

Figura 14. Sistema de pirolisis para la obtención de carbón activado a partir de bambú



Fuente: PRIAS BARRAGAN, Jhon, *et al.* Identificación de las variables óptimas para la obtención de carbón activado a partir del precursor *Guadua angustifolia Kunth*. En: Revista Académica Colombiana de ciencias, Armenia. Junio, 2011, no. 35 (135). p.160.

Tabla 2. Convenciones de la figura 14.

1	Bala de N ₂ (g) suministrada por PRAXAIR Co.
2	Regulador de N ₂ (g) con medidor de flujo CGA/580
3	Horno tipo mufla Maxthermo con controlador PID MC 5438
4	Tubo condensador recto y en serpentín, embudo de decantación
5	Bomba sumergible EVANS Aqua30W
6	Bomba de vacío WELCH 2019B-01

Fuente: elaboración propia

Se realizó el montaje con las especificaciones establecidas en la figura 14. Utilizando los materiales y equipos mencionados en la Tabla 2.

2.3.1 Fase de Carbonización del bambú. Para el proceso de carbonización se utilizaron 10 muestras de material vegetal proveniente del bambú a diferentes tiempos y temperaturas, esto con el fin de aprovechar la fuente de carbono sin generar mayores pérdidas por un mayor tiempo de permanencia dentro del horno o por una elevación desmedida de la temperatura, ya que la intención de maximizar el área superficial del carbón activado, depende directamente de las variables de temperatura y tiempo.³⁰

³⁰ VELAZQUEZ-TRUJILLO, A.; BOLANOS-REYNOSO, E. y PLIEGO- BRAVO, Y.S. Optimización de la producción de carbón activado a partir de bambú. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. [online]. 2010 vol.9, n.3, p.359. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382010000300010&lng=es&nrm=iso>. ISSN 1665-2738.

Se tomaron un total de 10 muestras para determinar la temperatura más adecuada de carbonización, realizando un análisis inmediato de porcentaje de carbono fijo en cada una. Los rangos de temperatura que se manejaron para el proceso de carbonización fueron desde 300°C hasta 750°C, con intervalos de 50°C entre cada experimento. Se tomaron tiempos de 60 minutos para las temperaturas que iban de los 300°C-500°C, y 30 minutos para las temperaturas más altas, de 550°C-750°C, ya que, para temperaturas de carbonización bajas, el contenido de carbono fijo obtenido en la carbonización está directamente relacionado con obtención de carbono en la descomposición de anillos aromáticos que se encuentran en la lignina. El rendimiento de obtención de carbón también se puede determinar por el grado de temperatura a la cual se encuentra expuesta la muestra de material vegetal, por eso se debe tener en cuenta la siguiente información:

- 200-300°C: La descomposición de grupos hidroxilo y enlaces carbono-oxígeno en la celulosa y hemicelulosa puede explicar las pérdidas de una gran cantidad de átomos de hidrógeno, oxígeno y carbono.
- 300-500°C: Hay un mayor número de enlaces carbono-hidrógeno y enlaces carbono-carbono descompuestos por calentamiento en relación con los otros enlaces involucrados en la descomposición de la lignina. Se puede deducir que la pérdida del número de átomos de hidrógeno es aún mayor, en comparación con la de los átomos de hidrógeno y oxígeno si se calentara entre 200 y 300°C.
- Por encima de 500°C: En este período, una gran cantidad de enlaces carbono-hidrógeno y carbono-carbono se descomponen en lo que sería el carbón de bambú, como se asocia con la aromaticidad de los átomos de carbono, lo que se estima por la pérdida del número de átomos de carbono incrementan con la elevación de la temperatura de carbonización.³¹

Luego de ser carbonizado se procedió a macerar para reducir su tamaño de partícula, para luego ser tamizado de tal forma que pudiera pasar por la malla MESH 325, eso quiere decir que el tamaño de partícula fuera menor a 0.044mm de diámetro.

2.4 CONDICIONES PARA EL MONTAJE DE LA ACTIVACIÓN DE CARBÓN DE BAMBÚ

Inicialmente se pensó en colocar aproximadamente 50g de carbón de bambú obtenido de la carbonización, pero no fue posible debido a que el horno no contaba con la capacidad de volumen, por eso se colocaron solo 10g del carbón de bambú escogido para que este tuviera la mayor área de contacto con el vapor de agua que se le inyectó. El carbón se colocó sobre una superficie metálica plana totalmente

³¹ ZUO, Song-Lin, et al. Carbonization mechanism of bamboo (*Phyllostachys*) by means of Fourier Transform Infrared and elemental analysis. *Journal of Forestry Research*, no. 14(1): p. 77. 2003.

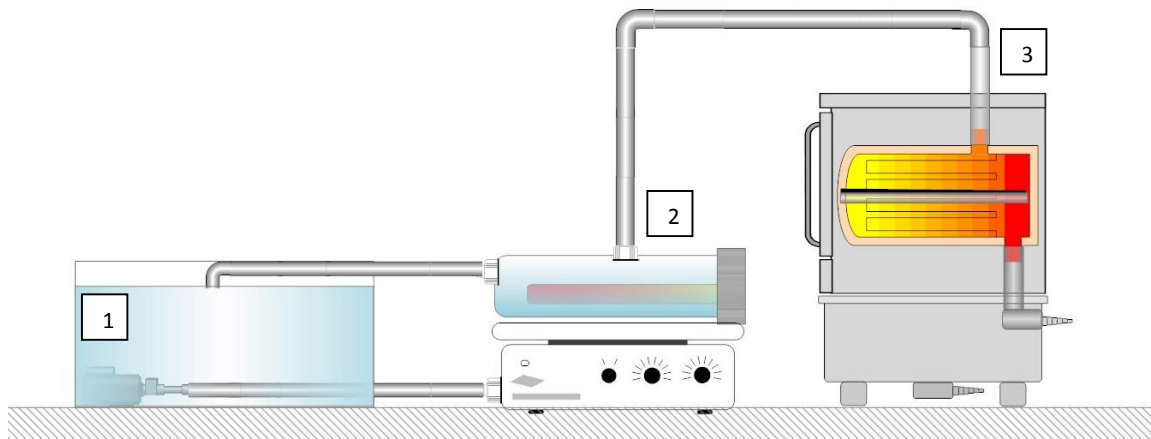
esparcido sobre ella para que todo el vapor de agua recayera sobre el carbón y pudiese tener un mejor contacto para llevar a cabo la activación, esto debido a que el proceso de activación normalmente se realiza en un horno rotatorio³² para que haya un mejor contacto de carbón y el agente activante, en caso de que sea una activación física.

Para el diseño del montaje del proceso de activación se utilizó el horno tipo mufla con controlador PID MC 5438 que se usó también en el proceso de carbonización, al cual se le adecuó una entrada de vapor de agua por la parte superior del horno para que tuviera el mayor contacto con la muestra de carbón; ya que no se contaba con una caldera o hervidor que manejara altos flujos volumétricos de vapor de agua, se adaptó un equipo de destilación de agua marca BOECO DEST-4 230V el cual genera un flujo constante de vapor de agua de aproximadamente 4L/min, que es una tasa de flujo aceptable para la cantidad de carbón de bambú que se utilizó para la activación. Para no generar mayores pérdidas en el consumo de agua se recirculaba el agua que no se evaporaba completamente cuando se hervía ya que este equipo manejaba un flujo de entrada de agua constante para poder funcionar, se ocupó la bomba sumergible marca EVANS Aqua30W que se usó en el proceso de condensación del licor piroleñoso en el proceso de carbonización para poder aprovechar el agua para evaporación sin generar gastos innecesarios.

Para finalizar se lavó el carbón activado obtenido con agua destilada a una temperatura de ebullición, y se dejó secando en el horno a una temperatura de 100°C por 3 horas con el propósito de eliminar impurezas, luego se maceró con un mortero y un pistilo para poder tamizarlo.

³² LOPEZ VALENCIA, Juan Pablo. Desarrollo de un carbón activado granular mediante activación física en un horno rotatorio. Tesis de maestría en Ingeniería química. Bogotá D.C. Universidad nacional de Colombia. 2014. p.10.

Figura 15. Sistema propuesto para la activación de carbón de bambú



Fuente: elaboración propia

Tabla 3. Convenciones de la figura 15.

1	Bomba sumergible EVANS Aqua30
2	Tubo de evaporación de agua BOECO DEST-4 230V
3	Horno tipo mufla Maxthermo con controlador PID MC5438

Fuente: elaboración propia

Una vez se postuló el montaje mostrado en la figura 15. Se procedió a realizar la instalación y acoplar las piezas con precisión para que no hubiera fugas en la inyección de vapor de agua al horno, y también que el agua que no se evaporó durante el proceso, fuera recuperada para poder aprovecharla.

2.4.1 Fase de Activación del Carbón de Bambú. Para las muestras de carbón de bambú que fueron utilizadas para realizar la activación, se estandarizaron rangos de temperatura desde 500°C hasta 650°C, en tiempos de 60 y 120 minutos para permitir que el vapor de agua penetre completamente en carbón y se genere la activación.

Se sugirió también realizar la experimentación con temperaturas mayores a 700°C, ya que en algunos ensayos de activación se proponen dichas temperaturas, pero como resultado se obtuvo carbón blanco, un carbón que se obtiene normalmente a altas temperaturas (800-1000°C o más), y también depende del tiempo de residencia. Aunque también cuenta con un buen índice de adsorción, no se realizaron pruebas de caracterización ya que la cantidad de carbón obtenido fue muy poca. Según los informes del Instituto de Ciencias forestales de la Universidad de Kioto, Japón, se han utilizado las características de un carbón blanco de bambú para desarrollar una placa delgada altamente conductora con un buen efecto de

barrera de onda electromagnética a través de un procesamiento especial. Este material emergente se está utilizando ampliamente en materiales de construcción, materiales aeroespaciales y materiales para ingeniería naval que requieren altas propiedades de barrera contra las ondas electromagnéticas.³³

Luego de obtener el carbón activado se procedió a lavarlo con agua destilada a una temperatura de 92°C para eliminar impurezas y luego dejarlo secar en un horno durante 3 horas a 100°C para retirar el exceso de humedad, y por último se maceró para reducir su tamaño de partícula.

2.5. FASE DE EXPERIMENTACIÓN CARACTERIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO DEL BAMBÚ

Se determinó la eficiencia de adsorción del carbón activado que se obtuvo en la fase anterior, con el propósito de seleccionar las condiciones adecuadas en el proceso de activación. Los métodos de ensayo de adsorción se indican en la norma técnica colombiana (NTC) 4467: "PRODUCTOS QUÍMICOS INDUSTRIALES: CARBÓN ACTIVADO. MÉTODOS DE ENSAYO", en donde se eligen los ensayos más comunes para poder ser comparados con otros carbones activados, entre esos ensayos están: determinación de número de yodo, determinación de la densidad aparente, determinación del índice de azul de metileno, y métodos generales para medir isothermas.

2.5.1 Ensayo de determinación de número de yodo. Este método se basa en la norma internacional ASTM D4607: "Determination of iodine number of activated carbon" y es utilizado para determinar el número de yodo, que se define como la capacidad tiene 1 gramo de carbón activado para adsorber una cantidad en mililitros de yodo, este número de yodo también determina el área superficial que puede tener el carbón que se estudió ya que el yodo se adsorbe en una monocapa en donde alberga microporos en cual se representa como un valor semejante al del área superficial (m^2/g). Los microporos del carbón confieren una mayor área superficial y una mayor retención de moléculas, mientras que los Macroporos y mesoporos tienden a retener partículas de gran tamaño como coloides o colorantes como se puede observar en los ensayos posteriores a este.

Se procedió a moler y a tamizar el carbón de tal manera que cumpliera con las especificaciones mencionadas en la norma, para luego colocarlo en contacto con la solución estandarizada de yodo, luego se filtró la solución resultante y se tomó una alícuota para luego ser titulada con una solución estandarizada de tiosulfato de sodio, el cual se usa normalmente en ensayos de yodometría. Como resultado se obtiene el volumen utilizado de titulante para calcular la cantidad de yodo adsorbido

³³ WENBIAO, Zhang, et al. Producción y aplicación de carbón de bambú y vinagre de bambú. 1 Ed. Beijing. Editorial Forestal China. 2006. p.99. ISBN 7-5038-4354-3

por la muestra de carbón activado, para este cálculo se utilizaron las siguientes ecuaciones que estas descritas en la norma:

Ecuación 6. Cantidad de yodo adsorbido por gramo de carbón

$$\frac{X}{M} = \frac{A - (2,4 \times B \times mL \text{ usados de la sln de tiosulfato de sodio})}{g \text{ de carbón empleados}}$$

Donde:

$\frac{X}{M}$ = mg de yodo adsorbidos por gramo de carbón

A = Normalidad de solución de yodo \times 6436,5

B = Normalidad de solución de tiosulfato de sodio \times 126,93

2,4 = Factor de la alícuota cuando se emplea HCl

Para luego proceder a la siguiente ecuación en donde se determina la normalidad del residuo filtrado:

Ecuación 7. Normalidad de residuo filtrado.

$$C = \frac{\text{Normalidad de sln de tiosulfato} \times mL \text{ de sln de tiosulfato}}{25 mL}$$

Donde:

C = Normalidad de residuo filtrado

Por último, se encontró el número de yodo con la ecuación descrita a continuación:

Ecuación 8. Número de yodo.

$$NI = \left(\frac{X}{M}\right) \times D$$

Donde:

NI = número de yodo

$\frac{X}{M}$ = mg de yodo adsorbidos por gramo de carbón

D = normalidad de residuo filtrado (C) corregido. Ver tabla en ANEXO A.

Se pesaron 0,65g de las muestras de carbón activado, en donde entraron en contacto con las soluciones de yodo 0,1N, tal como se muestra en la figura 16.

Figura 16. Filtración de las muestras de carbón activado impregnadas con la solución de yodo 0,1N.



Fuente: elaboración propia

Luego se procedió a la titulación para determinar la cantidad de yodo adsorbido por el carbón, como se puede observar en la figura 17, Con el propósito de encontrar la variable problema que en este caso es el volumen de titulante gastado para que exista una decoloración en la solución de yodo.

Figura 17. Titulación de solución de yodo residual, con solución de tiosulfato de sodio 0,1N la cual se rectifica con una solución de almidón estándar.



Fuente: elaboración propia

Cada una de las titulaciones concluyó cuando la solución titulada resultó siendo transparente, en ese momento se detuvo el goteo de titulante y se determinó el volumen gastado para realizar cálculos correspondientes para hallar el número de yodo.

2.5.2 Determinación de la densidad aparente. La densidad aparente de un carbón se define como el volumen que tiende ocupar un peso determinado de carbón activado en donde se incluyen los poros y espacios vacíos que hay entre partículas del carbón, esta propiedad intrínseca de los carbones activados es muy importante para la eficiencia del mismo, ya que entre menor volumen ocupe un carbón por una masa específica, tiende a una mayor adsorción con respecto a otros carbones que tengan una densidad mayor. La densidad aparente se calcula de gramos sobre centímetros cúbicos (g/cm^3).

Para llevar a cabo el ensayo se pesaron 10 g de muestra de carbón activado, para luego transferirlos a una probeta de 100 mL, en donde se apisonó el contenido para haya la menor cantidad de espacios vacíos, y así tener un valor más aproximado de la densidad aparente, luego se observó el volumen marcado en la probeta para determinar el volumen de la muestra en base seca. La densidad aparente se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 9. Densidad aparente del carbón activado.

$$\rho_a = \frac{(g \text{ de muestra}) \times (100 - \%H_{CA})}{V \text{ de la muestra} \times 100}$$

Donde:

ρ_a = Densidad aparente

$\%H_{CA}$ = Porcentaje de humedad del carbón activado

Volumen de muestra expresado en m^3

La humedad que contenía el carbón activado se calcula a partir de la ecuación descrita a continuación:

Ecuación 10. Porcentaje de humedad.

$$\%H_{CA} = \frac{g \text{ de carbón activado}}{g \text{ de muestra carbonizada}} \times 100$$

Donde:

$\%H_{CA}$ = Porcentaje de humedad del carbón activado

2.5.3 Determinación del índice de azul de metileno. El índice de azul de metileno se determina por la capacidad de adsorción que tiene la capacidad de retener moléculas grandes como la de este colorante, es una manera muy eficiente de comparar diferentes lotes de una misma clase de carbón.

Se realizó la solución de azul de metileno propuesta por la norma la cual tenía una concentración de 1200 mg/L descrita y luego pesaron 0,1 g de cada una de las

muestras de carbón activado por separado, se colocaron en recipientes para luego agregar 25mL de solución de azul de metileno en cada uno, obteniendo una mezcla de carbón activado con la solución de azul de metileno como se muestra en la figura 18., cada una de las muestras se agitar muy bien de tal manera que se observara una decoloración en la mezcla, luego de notar la ausencia de color azul en las mezclas, se procedió a colocar 5 mL adicionales de la solución de azul de metileno a la mezcla, y nuevamente se agitó hasta notar decoloración, por último se repitió la adición de la solución de azul de metileno a las mezclas en cantidades de volumen definidas, hasta que dejó de ocurrir la decoloración.

Figura 18. Muestras de carbón activado impregnadas con la solución de azul de metileno



Fuente: elaboración propia

Una vez en la mezcla obtenida se obtuvo un color azul tenue, se para de agregar solución de azul de metileno. El índice de azul de metileno se determina por los mililitros consumidos por la solución de azul decolorada.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 SELECCIÓN DE BAMBÚ SEGÚN SU MADURACIÓN

Hay una gran similitud con respecto a la composición química de todas las plantas que pertenecen a la familia del bambú, los componentes principales de los culmos de bambú son la celulosa, hemicelulosa y lignina, los cuales constituyen más del 90% de la planta en general, otros componentes menores son resinas, taninos, sales inorgánicas y ceras, aunque, si se compara con otros productos forestales maderables contiene un contenido mayor de cenizas, componentes de sílice y principales anteriormente mencionados que son almidones, sacáridos desoxidados, grasas y proteínas. El contenido de carbohidratos de la planta presenta un papel muy importante con respecto a la vida útil de la planta y la durabilidad de la misma.¹ A continuación, se presentan los porcentajes de composición química de algunas de las especies de bambú maderables más representativas:

Tabla 4. Análisis químico de las principales especies de bambú maderables.^{2,3}

Especie	Porcentaje en base húmeda (%)			
	Cenizas	Lignina	Celulosa	Hemicelulosa
<i>Phyllostachys Heterocycla</i>	1.3	26.1	49.1	27.7
<i>Phyllostachys Nigra</i>	2.0	23.8	42.3	24.1
<i>Phyllostachys Reticulata</i>	1.9	25.3	25.3	26.5
<i>Guadua Angustifolia Kunth</i>	3.8	21.9	47.1	21.9
<i>Chusquea Ramosissima</i>	3.4	18.3	32.1	54.1

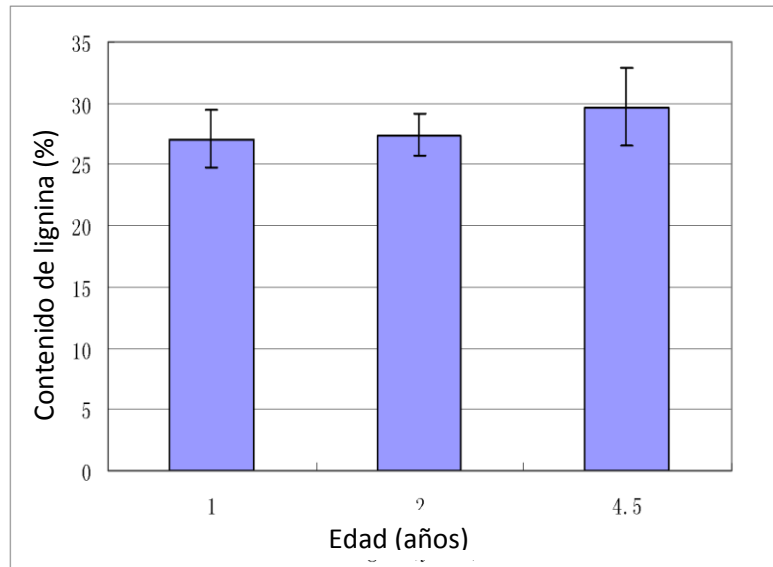
Fuente: LI, Xiaobo. Physical, chemical, and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing. En: LSU Master's Theses. 2004.p . 866.

http://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_theses/866

Generalmente hablando, en la mayoría de especies maderables de bambú es importante su estructura lignocelulósica, ya que cuando se somete a altas temperaturas se produce carbón, vapor de agua, dióxido de carbono y otros vapores que son producto de la pirolisis, y también es importante el porcentaje de material volátil ya que en la combustión de la madera y la activación del carbón hace que el bambú desarrolle una mayor porosidad, ya que al calentarse dicho material volátil va dejando espacios vacíos de volumen disponibles que pueden adsorber una mayor cantidad de moleculares de un tamaño menor a los poros resultantes en la activación.⁴

El contenido lignocelulósico y el porcentaje de material volátil para el bambú como material virgen, tiende a variar con respecto a la edad, tal como se puede observar en la figura 19. En donde se puede determinar que el contenido de lignina aumenta con respecto a la edad del culmo de bambú:

Figura 19. Variación de contenido de lignina con respecto a la edad del culmo de bambú



FUENTE: ZHONG, Zeke. Bamboo: a feasible biomass energy, China: Chinese academy of Forestry, 2017.

A partir de esto se puede determinar que el contenido lignocelulósico aumenta con respecto a la edad de maduración del culmo de bambú, para este caso se entiende que la edad es directamente proporcional al contenido de carbono fijo en la planta, lo cual es conveniente para la producción de carbón activado escoger los culmos que se encuentren dentro de los 3 y 5 años aproximadamente.

3.1.1 Análisis elemental de Bambú. Este análisis determina la composición porcentual de cada elemento químico que compone en su mayoría a la muestra que se desea estudiar, por ejemplo, la cantidad de carbono, hidrogeno, oxígeno, nitrógeno y azufre que se examinan normalmente en una muestra orgánica. Para este caso es importante comparar información que mencione análisis elementales de otras especies de bambú, resaltando la composición de carbono y oxígeno ya que estos dos indicadores pueden dar indicios de una mejora en el rendimiento del proceso de obtención de carbón a partir de bambú.

Una de las cualidades del bambú es que tiene una alta tasa de crecimiento, en donde, según su especie puede variar desde 11-21 cm/día, eso quiere decir que hay un incremento en la biomasa y puede haber mayor rentabilidad si se quisiera obtener una mayor cantidad de producido, esto influye directamente en el análisis elemental del material vegetal, ya que su composición varía con respecto a la edad en la cual se hizo el corte para su aprovechamiento. Esto se puede ver reflejado en la siguiente tabla 3.

Tabla 5. Análisis elemental de dos especies de bambú de diferentes edades

	<i>Pseudosasa amabilis</i>			<i>Pleioblastus chino</i>		
	1 año	2 años	3 años	1 año	2 años	3 años
C (wt.%)	47.83bc	47.41bc	48.70bc	43.77a	46.58ab	50.50c
H (wt.%)	7.64a	7.10a	7.72a	7.17a	7.78a	7.29a
N (wt.%)	0.80a	0.68a	1.52a	0.72a	0.69a	1.17a
O (wt.%)	43.73ab	44.81ab	42.05a	48.34b	44.95ab	41.04a

Fuente: CHENG, Liang. *Et al.* Characterization of bamboo species at different ages and bio-oil production. *Journal of Analytical and Applied Technologies*. p. 219.

Donde:

wt. %= Porcentaje en peso

Por otro lado, se investigó a cerca de las propiedades físicas, químicas y mecánicas del bambú de la especie *Chusquea Scandens Kunth*, pero no hubo éxito en la búsqueda ya que la planta no ha sido estudiada hasta la presente investigación, únicamente ha sido estudiada con fines bromatológicos y taxonómicos. Sin embargo, hay antecedentes de composición química del bambú de la especie *Chusquea Ramosissima*, la cual es una especie de bambú que pertenece a la misma subtribu del bambú en estudio, así que se puede inferir que su composición química puede llegar a ser muy similar entre sí, encontrando únicamente los datos reflejados en la siguiente tabla 4:

Tabla 6. Calidad de la broza vegetal de *Chusquea Ramosissima* y *socorea bompanzii*. Composición química (% peso seco).

Tipo de hojarasca	Humedad	MO	C	Azúcar	Hemicelulosa	Lignina
Hojas bambú	9,91	64,1	32	14,9	53,4	14,98
Hojas <i>Sorocea sp</i>	9,10	75,9	37,9	13,1	58,0	13,07
Ramas de Bambú	9,78	81,8	40,9	46,4	32,4	18,3
Culmos de bambú	11,2	94,3	47,2	32,1	54,1	13,6

*Nota: Donde MO: Materia orgánica, C: Contenido de carbono

Fuente: MONTTI, Lía Fernanda. Ecología y fisiología de *Chusquea Ramosissima*, una especie de bambú monocárpico y los efectos de su floración sobre la dinámica y

Como se puede observar en la tabla anterior, se encuentra el contenido de carbono de el follaje, las ramas y el culmo del bambú, en donde el ultimo mencionado muestra un mayor contenido de carbono en comparación con el follaje y las ramas del bambú.

3.1.2 Edad del culmo de bambú. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) en la resolución 1740 de 2016 y la corporación autónoma regional de Cundinamarca (CAR) mencionan las características físicas para determinar fácilmente la edad del culmo de bambú para su aprovechamiento³⁴

- Bambú en renuevo o rebrote: Son los nuevos tallos o brotes menores a 1m de alto que recién emergen de la tierra, ya que su método de reproducción y propagación es rizomática, en el cual aparecen hojas de color café y aun no tiene ramas
- Bambú verde o biche: Se caracteriza por la presencia de ramas y follaje de verde intenso, al igual que el color de su culmo y tiende a medir entre 1-3 m de alto. Normalmente no se recomienda cortarla para aprovechar su madera porque su estructura fibrosa aún no se ha formado del todo ya que contiene un alto contenido de azucares y almidones.
- Bambú maduro: también nombrado Gecha, este bambú es apto para su aprovechamiento ya que se encuentra en su mayor altura, logrando alcanzar 8 m, llegando a su mayor contenido de biomasa, su color es de tonalidades verdes y amarillas y se denotan manchas grisáceas en el culmo
- Bambú sobremaduro o seco: la tonalidad del culmo el completamente amarilla con manchas cafés en donde se evidencia que la planta no posee ninguna actividad fisiológica, por ende, se aprecia una ausencia de follaje en la planta y además pierde sus propiedades químicas y mecánicas

3.2 SELECCIÓN DE BAMBÚ PARA CARBONIZACIÓN

Se escogieron los culmos de bambú *Chusquea Scandens Kunth* que tuvieran entre 3 y 5 años de edad, esto se puede lograr mediante las descripciones dadas por información taxonómica de la planta según su maduración. La composición química del bambú fue la primera variable que se comparó, en donde principalmente el contenido de biomasa incrementa con respecto a la edad, el cual es directamente proporcional al contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, en donde la lignina es la que se descompone en carbono principalmente, en donde se buscó maximizar el rendimiento de este.

Ya que la planta no cuenta con estudios previos, se tomó información de la *chusquea Ramosissima*, la cual fue estudiada recientemente para un estudio

³⁴ DIAZ, Lucia, et al A producir Guadua en Cundinamarca. Bogotá, Grafo 'I CAS CORTES LTDA. 2012, p.19.

bromatológico, mostrando un contenido de carbono elemental de 47,2%, y esta información se comparó con el porcentaje de carbono elemental de otras especies de bambú con las cuales se ha fabricado carbón como se puede ver en la siguiente tabla 9:

Tabla 7, porcentaje de carbono elemental en algunas especies de bambú

Especie	Contenido de carbono (%)
<i>Chusquea Ramosissima</i>	47.2
<i>Pseudosasa Amabilis</i>	48.7
<i>Pleubastus Chino</i>	50.50
<i>Bambusa Vulgaris</i>	47.6
<i>Phyllostachys Edulis</i>	46.8

Fuente: elaboración propia

A partir de esto se puede decir que, el bambú de la sub familia de *Chusquea* es un material adecuado para la producción de carbón ya que prácticamente cuenta con el 47-51% de rendimiento a comparación de otros carbones provenientes de otras fuentes vegetales.

3.2.1 Selección del culmo de bambú según las características físicas. El bambú maduro cuando es apto para su aprovechamiento se encuentra en su mayor altura, logrando alcanzar hasta 8 m, llegando a su mayor contenido de biomasa, su color es de tonalidades verdes y amarillas y se denotan manchas grisáceas en el culmo. Según estas características se logró identificar los culmos de la edad que se estaba buscando. Se puede utilizar también los residuos del follaje del bambú ya que este compone el 50% de la biomasa total, pero se puede observar en la tabla 3. Que el follaje y las ramas no tienen la cantidad de carbono elemental que contiene el culmo, porque la composición de carbono elemental es menor que en los culmos.

3.3 ANÁLISIS INMEDIATO DEL BAMBÚ CHUSQUEA SCANDENS KUNTH

Los resultados del análisis inmediato del bambú *Chusquea Scandens Kunth* fueron obtenidos mediante las normas ASTM revisadas y descritas previamente, para mostrar los siguientes resultados:

Tabla 8. Resultado de análisis inmediato de bambú de la especie *Chusquea Scandens Kunth*

Especie	%H	%MV	%C	%Cf
<i>Chusquea Scandens Kunth</i>	5.61	70.59	3.65	20.15

Fuente: elaboración propia

Donde:

%H= Porcentaje de humedad

%MV= Porcentaje de material volátil

%C= Porcentaje de cenizas

%Cf= Porcentaje de carbono fijo

Si se compara con los análisis inmediatos de otras especies de bambú se puede decir que la chusquea, aún conservaba humedad al momento del desarrollo de los análisis respectivos, en donde se deduce que pudo haber sido parte del contenido del carbono fijo, tal como lo podemos apreciar con el análisis de la especie *Bambusa vulgaris*, en donde la experimentación se realizó en base seca y se puede observar que tiene un mayor porcentaje de carbono fijo. Esto define la eficiencia que tiene el material propuesto para producir carbón.

Tabla 9. Caracterización de materia prima para producción de carbón activado.

Especie	%H	%MV	%C	%Cf
<i>Bambusa Vulgaris</i>	0.01	73.88	1.46	24.65
<i>Phyllostachys Edulis</i>	0	80.6	3.9	15.6

Fuente: VELAZQUEZ-TRUJILLO, A.; BOLANOS-REYNOSO, E. y PLIEGO- BRAVO, Y.S. Optimización de la producción de carbón activado a partir de bambú. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 2010 vol.9, n.3, p.361.

Donde:

%H= Porcentaje de humedad

%MV= Porcentaje de material volátil

%C= Porcentaje de cenizas

%Cf= Porcentaje de carbono fijo

3.4 CARBONIZACIÓN DEL BAMBÚ

Para la fase de carbonización se definieron 10 muestras, en las cuales se varió la temperatura en intervalos de 50°C desde 300-750°C con el propósito de determinar el carbón que tuviera la mayor cantidad de carbono total, pero también se varió el tiempo ya que si únicamente se variaba la temperatura en el mismo tiempo, esto generaba un mayor gasto energético ya que el horno tipo mufla que se usó en el proceso de experimentación usaba resistencias de 230V, y lo adecuado era mitigar el consumo energético en las temperaturas más altas recortando el tiempo de carbonización a la mitad, el flujo de nitrógeno para garantizar una atmosfera anaerobia se dejó constante a una tasa de 5L/min para que no se alterara el sistema por otros motivos que no fueron tenidos en cuenta, es por eso que se toman las variables de la siguiente tabla:

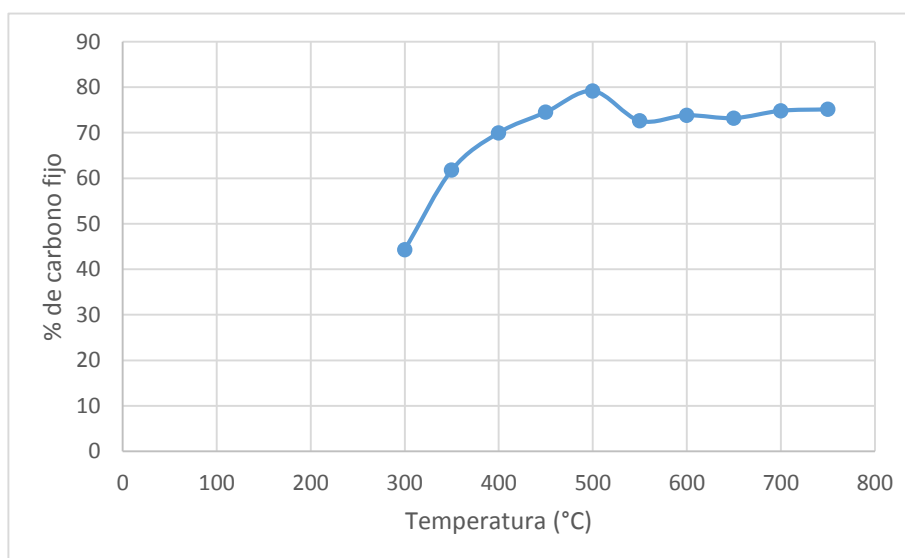
Tabla 10. Temperaturas establecidas de temperatura (°C) y tiempo (min) para cada una de las muestras a carbonizar.

Muestra	Temperatura (°C)	tiempo (min)
1	300	60
2	350	60
3	400	60
4	450	60
5	500	60
6	550	30
7	600	30
8	650	30
9	700	30
10	750	30

Fuente: elaboración propia

Luego de obtener el carbón de cada una de las muestras se procedió a realizar un análisis inmediato a cada uno de los carbones obtenidos, para determinar el contenido de carbono fijo que había en cada muestra, Para ello se utilizaron los mismos métodos previamente mencionados de caracterización del bambú, y de esto se obtiene el contenido de carbono fijo del carbón el cual es importante tener en cuenta ya esto genera mayores probabilidades de una mejor eficiencia en la adsorción de partículas mediana grandes, gracias a los macroporos y mesoporos que resultan de la activación.

Grafica 1. Variación de la temperatura con respecto al contenido de carbono fijo en muestras de carbón de bambú



Fuente: elaboración propia

Se puede apreciar que el contenido de carbono fijo de la muestra es directamente proporcional al incremento de la temperatura, pero al modificar el factor tiempo hay una fase estacionaria donde el contenido de carbono fijo es constante, se podría decir que en este punto la variable de tiempo es indispensable para obtener una mayor cantidad de carbono en la muestra de bambú.

La muestra (5) que se carbonizó a una temperatura de 500°C durante 60 minutos, fue la muestra con el mayor contenido de carbono, según los análisis inmediatos que se les realizó a cada una, estas fueron las condiciones más adecuadas de carbonización para obtener un carbón que contiene un total de 80,16% de carbono fijo. Se puede decir también que este carbón obtenido de las condiciones de tiempo y temperatura que fueron mencionadas, fue el que se utilizó en el proceso de activación y para ello se tuvo que producir una mayor cantidad de carbón con las especificaciones ya mencionadas para poder realizar los ensayos de activación.

3.5 ACTIVACIÓN DE BAMBÚ

Inicialmente se tomó el carbón que resultó de la carbonización para realizar la activación, y se colocó en la mufla en contacto con el vapor de agua que tenía un flujo volumétrico constante de 4L/min. En este proceso también se modificaron las variables de temperatura y tiempo de la siguiente manera:

Tabla 11. Temperaturas establecidas de temperatura (°C) y tiempo (min) para cada una de las muestras a activar.

Muestra	Temperatura (°C)	tiempo (min)
1	500	
2	550	60
3	600	
4	650	
5	500	
6	550	120
7	600	
8	650	

Fuente elaboración propia

Se escogieron estas temperaturas porque la eficiencia de la activación es muy baja en temperaturas menores a 450°C y se intentó realizar la activación en temperaturas más altas, pero, el producto final era de bajo rendimiento, por la poca cantidad obtenida al final de la activación, se estima que esto fue causado por la cantidad que se utilizó de muestra carbonizada la cual fue de 20g. por cuestiones de mejorar la capa superficial y que hubiese un mejor contacto entre el vapor de agua y el carbón. Posterior a la activación se realizaron los ensayos de eficiencia en la adsorción de los carbones activados obtenidos, uno de estos que es considerado el más relevante es índice de número de yodo en el cual se obtuvo que para el carbón

el cual fue sometido a activación con una temperatura de 600°C por un tiempo de 120 minutos, obteniendo un número de yodo de 998.1 mg/g, siendo el valor más significativo a comparación de los demás carbones activados obtenidos y analizados.

3.6 ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE NÚMERO DE YODO

Una vez obtenidos los carbones, se procedió a realizar las pruebas de determinación de número de yodo para cada muestra, fueron un total de 8 análisis que se hicieron en consecutivo, una vez terminada la titulación se midió el volumen utilizado, ya que era una variable relevante que solo se podía obtener experimentalmente. Los resultados obtenidos se pueden observar en la siguiente tabla 14.

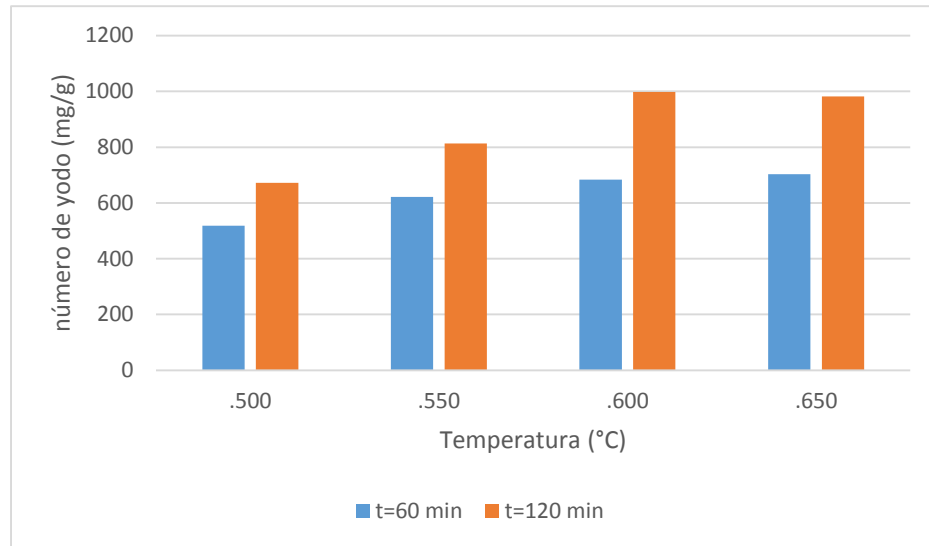
Tabla 12. Numero de yodo obtenido por muestra de carbón activado.

Muestra	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Numero de yodo (mg/g)
1	60	500	518.2
2		550	621.8
3		600	683.4
4		650	703.3
5	120	500	671.9
6		550	813.5
7		600	998.1
8		650	982.4

Fuente: elaboración propia

La tabla anterior se puede traducir en el gráfico 2. En la cual el carbón que se activó a una temperatura de 600°C y un tiempo de residencia de 120 minutos fue el carbón que adsorbió una mayor cantidad de yodo, eso se traduce en que la eficiencia de este carbón es mayor en comparación con los demás.

Grafico 2. Variación de la capacidad de adsorción de los carbones activados con respecto a la temperatura de activación.



Fuente: elaboración propia

3.7 ÍNDICE DE AZUL DE METILENO

Los resultados del análisis con respecto al índice de azul de metileno se muestran en la tabla 14, donde se puede observar el volumen de solución de azul de metileno adsorbido por gramo de carbón activado.

Para medir la adsorción fue necesario saber los mililitros adicionales se utilizaron para saturar la muestra de carbón activado inmersa en la solución de azul de metileno, es por eso que se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 11. Ecuación de índice de azul de metileno.

$$I_{AM} = \frac{(C_f - C_i) \times V}{W_c}$$

Donde:

I_{AM} = índice de azul de metileno

C_f = Absorbancia final (nm)

C_i = Absorbancia inicial (nm)

V = Volumen utilizado de azul de metileno

W_c = Peso de la muestra de carbón

Obteniendo como resultado los siguientes datos, a partir de los análisis realizados de adsorción de azul de metileno.

Tabla 13. Índice de azul de metileno.

Muestra	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Índice de azul de metileno (mg/g)
1	60	500	224.1
2		550	356.5
3		600	388.3
4		650	453.4
5	120	500	484.2
6		550	540.8
7		600	630.2
8		650	619.6

Fuente: elaboración propia

La tabla anterior muestra la cantidad de azul de metileno en miligramos adsorbidos por cada gramo de carbón activado, como se puede observar el carbón que se sometió a una temperatura de 600°C por un tiempo de 120 minutos, es el que mayor capacidad de adsorción tiene, esto quiere decir que este carbón está compuesto por una mayor cantidad de mesoporos y macroporos, que permiten capturar partículas grandes como lo puede llegar a ser un pigmento como el azul de metileno. Se esperaba que en el carbón activado (muestra 8) obtuviera un mejor rendimiento dentro de las pruebas de determinación de área superficial, pero no fue así, ya que normalmente la temperatura y el tiempo de activación son directamente proporcionales a la eficiencia de adsorción de los carbones activados, a partir de estos se puede inferir que el carbón activado (muestra 8) no tuvo un buen contacto con el vapor de agua que este caso es el agente activante.

3.8 DENSIDAD APARENTE

El ensayo de densidad aparente se realizó para las 8 muestras de carbón activado donde se utilizaron 8 probetas de 100±1 mL en los cuales, se comprimieron para tener la menor cantidad de aire dentro de las probetas. Los resultados obtenidos se reflejan en la siguiente tabla.

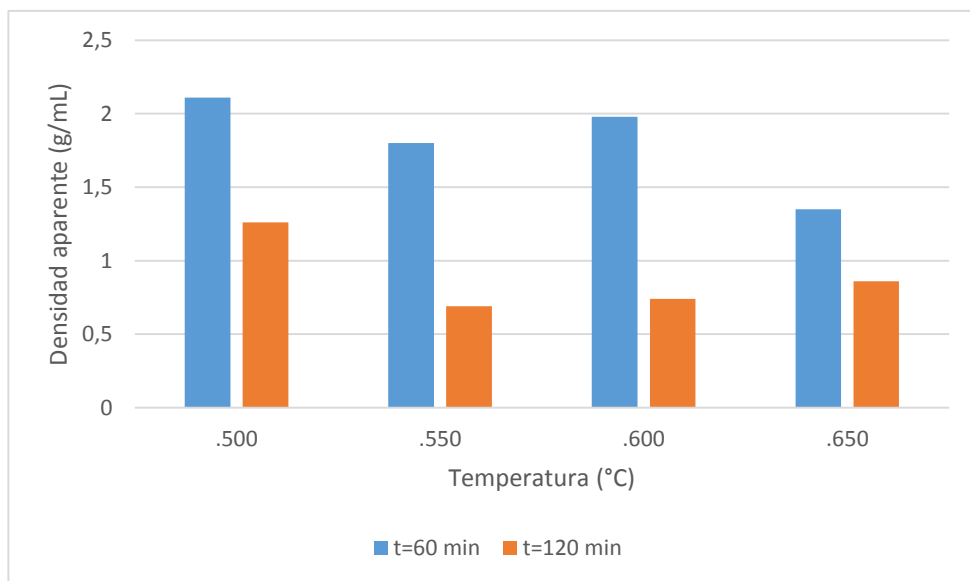
Tabla 14. Densidad aparente de las muestras de carbón activado

Muestra	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Densidad aparente (g/mL)
1	60	500	2.11
2		550	1.80
3		600	1.98
4		650	1.35
5	120	500	1.26
6		550	0.69
7		600	0.74
8		650	0.86

Fuente: elaboración propia

La densidad aparente que se calculó para los carbones activados varía de 0.69-2.11g/mL, esto indica que la eficiencia de un carbón con una densidad aparente baja es mayor porque se necesita la misma cantidad de carbón que normalmente se usa para la adsorción de algún componente en específico, pero tiende a rendir para que puede retener más adsorbato por un volumen determinado, se puede apreciar mejor en el siguiente gráfico:

Grafico 3. Densidad aparente de las muestras de carbón activado.



Fuente: elaboración propia

4. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

Se evaluó la eficiencia obtenida en el proceso de obtención de carbón activado a partir de bambú de la especie *Chusquea Scandens Kunth* a partir de las condiciones más adecuadas para este experimento de temperatura y tiempo de residencia en los procesos de carbonización y activación.

El rendimiento de los procesos de carbonización y activación se definen como la cantidad de material vegetal o bambú previamente adecuado para la obtención de carbón que entró al proceso, y la cantidad de carbón activado resultante del proceso, para esto se tomó en cuenta el carbón con el mayor contenido de carbono fijo, para realizar la activación y también se tomó en cuenta el carbón activado que obtuvo la mayor eficiencia de adsorción en las pruebas de caracterización. Las condiciones de temperatura y tiempo se definen en las siguientes tablas para los respectivos procesos:

Tabla 15. Condiciones de temperatura y tiempo adecuadas para el proceso de carbonización de bambú de la especie *Chusquea scandens Kunth*.

Muestra	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
Carbón de bambú	60	500

Fuente: elaboración propia

Tabla 16. Condiciones de temperatura y tiempo adecuadas para el proceso de activación de carbón de bambú de la especie *Chusquea scandens Kunth*.

Muestra	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
Carbón activado de bambú	120	600

Fuente: elaboración propia

Con base a estos resultados obtenidos en la fase experimental, se realizaron los análisis de costos correspondientes para determinar la viabilidad del proyecto.

4.1 RENDIMIENTO

El rendimiento de cada uno de los procesos se evaluó con respecto a los balances de masa respectivos en cada una de las fases del proceso, que fueron carbonización y activación.

Tabla 17. Evaluación del rendimiento para el proceso de carbonización de bambú de la especie *Chusquea scandens Kunth*.

Fuente: elaboración propia

A partir de la tabla anterior se puede decir que, se obtuvo un rendimiento promedio del 50 de producido, lo cual era lo esperado ya que como se pudo determinar, la

Muestra	Temperatura (°C)	tiempo (min)	Alimento (g)	Carbón obtenido (g)	Rendimiento (%)
1	300	60	50	28.2	56.4
2	350	60	50	25.8	51.6
3	400	60	50	26.9	52.8
4	450	60	50	25.6	51.2
5	500	60	50	25.2	50.4
6	550	30	50	29.4	58.8
7	600	30	50	28.6	57.2
8	650	30	50	24.1	48.2
9	700	30	50	21.3	42.6
10	750	30	50	19.8	39.6

composición del bambú se compone principalmente por celulosa, que es lo primero que se degrada a temperaturas de 300-500°C en el culmo de bambú.

Para el caso del carbón de bambú que se escogió para realizar las pruebas de activación, tiene un rendimiento del 50.4 % lo cual es un rendimiento aceptable con respecto a las otras muestras siendo este valor determinante en el momento de hacer analizado los costos de producción.

Para el proceso de activación también se calculó el rendimiento ya que el carbón de bambú tiende a degradarse en temperaturas altas y tiempos prolongados, esto también se debe tener en cuenta para realizar el análisis de costos de producción. Se recuperó la muestra más significativa de carbón de bambú que fue la muestra 5 de la tabla anterior y se replicó el proceso para producir 8 muestras, que fueron las que se usaron en el proceso de activación y luego se analizaron mediante ensayos para carbón activado y así determinar su eficiencia de adsorción, el proceso de activación también generó una descomposición del material volátil restante en las muestras por ende hay una reducción de cantidad en el producto terminado con respecto a la cantidad que se obtuvo en la carbonización.

Los datos del rendimiento del proceso de activación se pueden ver reflejados en la tabla 18. En donde se mencionan las temperaturas utilizadas y los tiempos respectivos de residencia en el proceso de activación, se puede observar el rendimiento del proceso interno en el cual las entradas con el carbón de bambú y el producto es carbón activado de bambú de la especie *Chusquea Scandens Kunth*.
Tabla 18. Evaluación del rendimiento para el proceso de carbonización de bambú de la especie *Chusquea scandens Kunth*.

Fuente: elaboración propia

A partir de estos datos se pudo determinar el rendimiento dentro del proceso de obtención de carbón activado, partiendo del que obtuvo la mejor eficiencia de adsorción dentro de los ensayos realizados para dicho fin, se puede decir también

Muestra	Temperatura (°C)	tiempo (min)	Alimento (g)	Carbón obtenido (g)	Rendimiento %
1	500	60	20	19,3	96,5
2	550	60	20	18,9	94,5
3	600	60	20	18,3	91,5
4	650	60	20	17,8	81
5	500	120	20	18,2	91
6	550	120	20	18,0	90
7	600	120	20	17,7	88,5
8	650	120	20	17,4	87

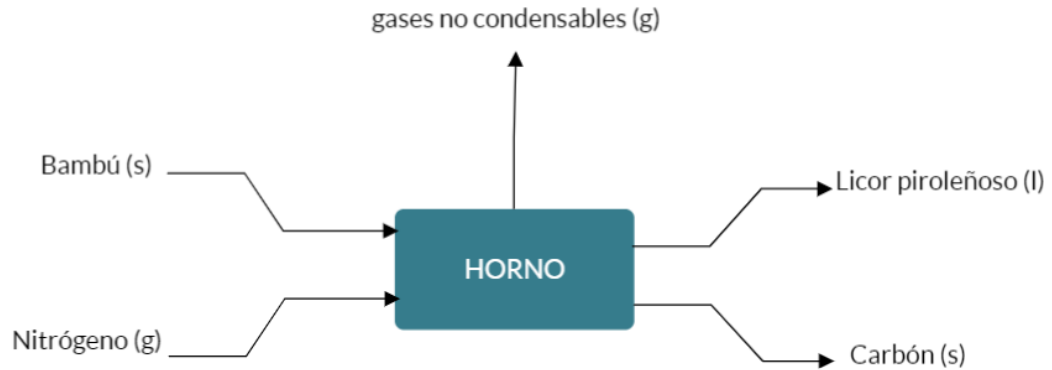
que la eficiencia de los carbones es inversamente proporcional a los rendimientos obtenidos en este proceso de activación en donde los carbones con mayor eficiencia tienen el menor rendimiento si se les compara con los demás.

Estos datos son importantes ya que con esta información se puede realizar el balance de masa del proceso.

4.2 BALANCE DE MASA DEL PROCESO DE CARBONIZACIÓN DE BAMBÚ

Para poder realizar el balance de masa se tuvieron en cuenta las materias primas directas, es decir, las que pertenecen al producto o tuvieron contacto con este, para ello se tomaron en cuenta la materia prima que fue el bambú y el nitrógeno gaseoso, así como se tuvieron en cuenta las salidas que fueron el licor piroleñoso que fue condensado y cuantificado para determinar la cantidad de co-producto, los gases no condensables y por último el carbón de bambú, a partir de esta información se realizó el diagrama del balance de masa propuesto para el proceso de carbonización

Figura 20. Balance de masa del proceso de carbonización del bambú de la especie *Chusquea Scandens Kunth*



*Nota: (s): estado sólido, (l) estado líquido, (g) estado gaseoso.

Fuente: elaboración propia

A partir de la figura 20. Se puede realizar la siguiente ecuación, la cual relaciona los flujos de masa de entrada con respecto a los de salida.

Ecuación 12. Balance de masa del proceso de obtención de carbón de bambú

$$m_{bambú} + m_{N_2} = m_{gnc} + m_{licor} + m_c$$

Donde:

$m_{bambú}$ = masa de entrada del bambú

m_{N_2} = masa de entrada de nitrógeno

m_{gnc} = gases no condensables, entre ellos compuesto aromáticos obtenidos por descomposición de lignina

m_{licor} = cantidad de licor piroleñoso obtenido del proceso de carbonización

m_c = cantidad de carbón obtenido a partir del bambú

Los gases no condensables se miden por la diferencia despejando el balance.

Tabla 19. Datos de balance de masa para el proceso de carbonización de bambú de la especie *Chusquea Scandens Kunth*

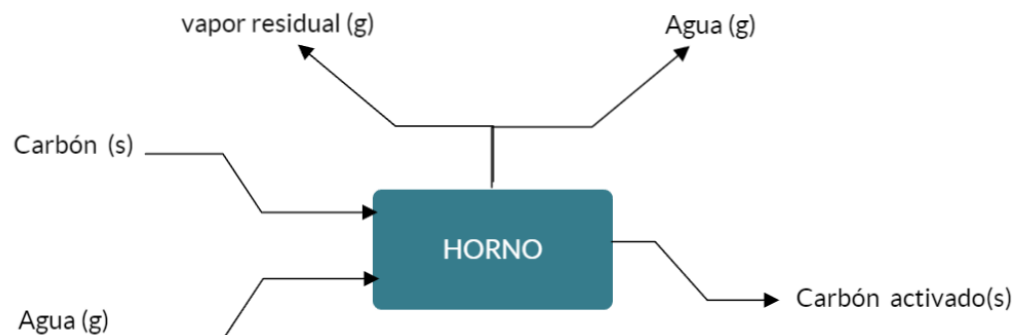
Corriente	Entradas (g/h)	Salidas (g/h)
Bambú (s)	50	-
Nitrógeno (g)	6,25	-
Licor piroleñoso (l)	-	9,25
Gases no condensables (g)	-	21,8
Carbón (s)	-	25,2
TOTAL	56,25	56,25

Fuente: elaboración propia

4.3 BALANCE DE MASA DEL PROCESO DE ACTIVACIÓN DE CARBÓN DE BAMBÚ

Se realizó el balance de masa en donde se contaron las materias primas directas, es decir, las que pertenecen al producto o tuvieron contacto con este, para ello se tomaron en cuenta la materia prima que fue el carbón resultante del proceso anterior y el vapor de agua, así como se tuvieron en cuenta las salidas que fueron el licor piroleñoso que fue condensado y cuantificado para determinar la cantidad de co-producto, los gases no condensables y por último el carbón de bambú, a partir de esta información se realizó el diagrama del balance de masa propuesto para el proceso de carbonización.

Figura 21. Balance de masa del proceso de activación del carbón obtenido del bambú de la especie *Chusquea Scandens Kunth*



*Nota: (S): estado sólido, (l) estado líquido, (g) estado gaseoso.
Fuente: elaboración propia

A partir de la figura 21. Se puede realizar a siguiente ecuación, la cual relaciona los flujos de masa de entrada con respecto a los de salida.

Ecuación 13. Balance de masa del proceso de obtención de carbón de bambú

$$m_c + m_{H_2O} = m_{vr} + m_{H_2O} + m_{CA}$$

Donde:

m_c = masa de carbón de bambú

m_{H_2O} = masa de entrada y salida de agua

$m_{m_{vr}}$ = masa de vapor residual

m_{CA} = masa de carbón activado de bambú

Los gases no condensables se miden por la diferencia espejando el balance, tal como lo muestra la siguiente tabla:

Tabla 20. Datos de balance de masa para el proceso de activación de carbón de bambú de la especie *Chusquea Scandens Kunth*

Corriente	Entradas (g/h)	Salidas (g/h)
Carbón (s)	20	-
agua (vap)	3986	3986
Vapor residual (g)	-	2.2
Carbón activado(s)	-	17.8
TOTAL	56,25	56,25

Fuente: elaboración propia

Los vapores residuales se obtuvieron a partir de la ecuación del balance de masa por diferencia de pesos en el proceso de carbón activado.

5. EVALUACIÓN FINANCIERA

El estudio financiero que se realiza en esta propuesta permite determinar la viabilidad del proyecto; en este se resume toda la información contenida en los capítulos anteriores, para ello se tendrá en cuenta principalmente los rubros económicos referentes a la inversión inicial, como equipos, gastos operativos y mano de obra directa e indirecta.

5.1 ACTIVOS FIJOS

En un proyecto de esta clase se presentan de naturaleza duradera son tangibles se utilizan a lo largo de la vida útil del proyecto.³⁵

Tabla 21. Inversiones Fijas.

EQUIPOS	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (COP)	PRECIO TOTAL (COP)
Triturador de madera	1	15.900.000	15.900.000
Tamiz	10	1.990.000	1.990.000
Caldera	1	9.882.000	9.882.000
Horno Eléctrico	1	12.617.400	12.617.400
Accesorios y Herramientas	-	800.000	800.000
Adecuaciones y adaptaciones de equipos	-	200.000	200.000
Muebles y enseres	-	3.000.000	3.000.000
Arriendo de terreno	-	4.300.000	4.300.000
Total			38.807.400

Fuente: elaboración propia

5.1.1 Costos de Producción. Los costos de producción (también llamados costos de operación) son los gastos necesarios para mantener un proyecto, dichos costos involucran todo lo requerido para llevar a cabo el proceso de carbonización y activación, estos costos son tanto directos como indirectos.

5.2 COSTOS DIRECTOS

Los costos directo, están relacionados al conjunto de las erogaciones en las que incurre cualquier empresa, sin importar el giro, y están directamente relacionados a la obtención del producto o servicio en torno al cual gira el desempeño de la empresa. Los costos directos que se relacionan en esta propuesta identifican el costo de la materia prima y de la mano de obra directa.

³⁵ GUZMAN, Fernando. Estudio Económico financiero y la Evaluación en proyectos de la industria química. Universidad Nacional de Colombia, 2001. p.26.

5.2.1 Materia Prima. La materia prima considera todos los elementos que se incluyen en la elaboración de un producto. La materia prima es todo aquel elemento que se transforma e incorpora en un producto final. Un producto terminado tiene incluido una serie de elementos y subproductos, que mediante un proceso de transformación permiten la confección del producto final. En la siguiente tabla se encuentra la cantidad de materia prima requerida para producir una tonelada de carbón activado. Estas cantidades son calculadas a partir de los balances de materia.

Tabla 22. Consumo materia Prima. (Pesos colombianos COP)

Consumo de Materia Prima /Ton de Carbón Activado				
Materia Prima	Cantidad	Unidad	Costo Unitario	Costo Total
Bambú	2.5	Ton	\$ 44.860	\$ 112.150
Agua	58	m ³	\$2.218	\$ 128.644
Nitrógeno	500	L	\$60.000	\$ 600.000
Total				\$ 840.794

Fuente: elaboración propia

5.2.2 Mano de obra directa. La mano de obra directa describe a los trabajadores que están directamente involucrados en la producción de bienes o la prestación de servicios, que, para este caso, las personas que estarán encargadas de la producción del carbón activado.

A continuación, se encuentra el monto salarial de la mano de obra directa, teniendo en cuenta las prestaciones sociales y obligaciones de los operarios contratados para la producción del Carbón activado.

Tabla 23. Monto salarial mano de obra directa por año teniendo en cuenta tres (3) operarios base.

Cargo	Operario
Salario mínimo*	\$ 8.281.160
Subsidio de Transporte*	\$97.032
Obligaciones del Empleador*	\$2.950.749
Total Empleado*	\$11.328.941
No. de Empleados	3
Total*	\$33.986.823

*Nota: los precios se muestran en pesos colombianos (COP)

Fuente: elaboración propia

5.3 COSTOS INDIRECTOS

Costo indirecto son aquellos que no son directamente imputables a la producción de un determinado producto o servicio y pueden afectar al proceso productivo en general de uno o más productos, por lo que no se puede asignar directamente a un solo producto sin usar algún criterio de asignación. Los costos indirectos que

relaciona esta propuesta se refieren a los materiales indirectos y a la mano de obra indirecta.

5.3.1 Materiales indirectos. Los materiales indirectos son utilizados en la elaboración de un producto, pero no son fácilmente identificables o que no amerita llevar un control sobre ellos y son incluidos como parte de los costos indirectos de Los gastos asociados a los materiales indirectos se encuentran relacionados al agua utilizada en el proceso de refrigeración en la producción de la activación del carbón de Bambú.

Tabla 24. Materiales Indirectos (pesos colombianos COP)

Material	Gasto Anual
Agua de refrigeración	\$254.675

Fuente: elaboración propia

5.3.2 Mano de obra indirecta. Los costos relacionados a la mano de obra indirecta, se refiere a los salarios pagados a los trabajadores que realizan tareas que no contribuyen directamente con la producción de bienes o la prestación de servicios, tales como los trabajadores de apoyo que ayudan a posibilitar a otros producir bienes. Para este caso se relaciona el servicio del ingeniero químico quien supervisa la producción y un administrador de operaciones para la supervisión logística del proceso.

Tabla 25. Mano de obra Indirecta por año

Cargo	Salario Básico*	Obligaciones del Empleador*	Total Empleado*	No. de Empleados
Ingeniero	\$ 15.000.000	\$ 8.085.000	\$ 22.161.600	1
Administrador	\$ 15.000.000	\$ 8.085.000	\$ 22.161.600	1
Total	\$44.323.200			

*Nota: Los precios se muestran en pesos colombianos (COP)

Fuente: elaboración propia

5.3.3 Otros gastos indirectos. Estos gastos incluyen el pago por servicios públicos relacionados al consumo de agua y energía que se consumen para la producción del Carbón activado.

5.4 CARGAS FABRILES

La carga Fabril, es denominada como costos generales de producción, costos indirectos de fabricación o gastos de fábrica, son todos los desembolsos que no pueden identificarse directamente con el bien producido, por tanto, no puede asociarse a la materia prima directa ni a la mano de obra directa.

Para este caso se tendrán en cuenta los gastos ocasionados en los balances de masa y energía requerida para la carbonización y activación del Bambú.

Tabla 26. Consumo por servicios de agua y energía (pesos colombianos COP)

Servicio Publico	Costo real	Utilizado	Costo Anual
Energía (kW/h)	\$468,83	2086,34 kWh	\$977.722,45
Acueducto (m ³)	\$2.218	450 m ³	\$998.100
Total			\$1.975.822,5

Fuente: elaboración propia

5.5 DEPRECIACIÓN DE MATERIALES

La depreciación se refiere a una disminución periódica del valor de un bien material o inmaterial. Esta depreciación puede derivarse de tres razones principales: el desgaste debido al uso de los equipos en este caso, el paso del tiempo en utilización de los equipos, donde deben tener un mantenimiento.

Tabla 27. Gastos de materiales Indirectos (pesos colombianos COP)

Material	Gasto Anual
Gastos generales de mantenimiento	\$500.000
Depreciación de equipos	\$2.990.400

Fuente: elaboración propia

5.6 COSTOS TOTALES

Los costos totales se calculan a partir del capital de trabajo y los materiales directos e indirectos como el capital de trabajo y los materiales directos e indirectos.

Tabla 28. Costos totales (pesos colombianos COP) calculados para una (1) tonelada de producción.

Descripción	Capital del Trabajo
Activos Fijos	\$38.807.400
Materia Prima	\$840.794
Mano de obra directa	\$3.398.682
Materiales indirectos	\$254.675
Mano de obra indirecta	\$4.432.320
Cargas Fabriles	\$1.975.822,5
Depreciación	\$349.040
Total capital de trabajo	\$49.709.738

Fuente: elaboración propia

A partir de los costos totales de producción se sacó un aproximado de lo que puede valer una (1) Tonelada de carbón activado obtenido del bambú de la especie *Chusquea Scandens Kunth*, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 29. Precio en dólares americanos por una (1) tonelada de carbón activado de bambú

Unidad (1 Ton)	Precio (\$USD)
Carbón activado de Chusquea Scandens Kunth	\$3.114

Fuente: elaboración propia

Los carbones activados actuales en el mercado tienen un costo aproximado de USD \$800-1300, sin tener en cuenta los costos de importación, aranceles, IVA y demás, lo cual se excedió para ser competitivo en el mercado, aunque con la actual tasa de importación, impuestos, aranceles y logística puede llegar a aumentar el costo a más de USD \$2.000, y esto puede ser conveniente para una planta en zona nacional con respecto a la producción de carbón activado.

6. CONCLUSIONES

A partir del desarrollo de los objetivos planteados en esta propuesta se pudo establecer las siguientes conclusiones:

- Se utilizó la activación física para evaluar la obtención del carbón activado utilizando la planta *Chusquea Scandens Kunth* el cual al someterla a un proceso de adsorción muestra que los resultados son eficientes en comparación con otros carbones activados, tal como se expresa en el análisis de los resultados.
- La selección de la especie de bambú *Chusquea Scandens Kunth* a nivel regional específicamente en la zona de Cundinamarca sometida al proceso de Carbonización es una alternativa viable para comercialización y aprovechamiento de los recursos locales
- Se seleccionó la mejor época de maduración para el corte de la planta donde se tuvo en cuenta las generalidades del corte en otras especies producidas en el territorio nacional como la *Guadua Angustifolia Kunth* y otras especies a nivel mundial.
- Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica, antecedentes y experiencias realizadas en otras investigaciones en torno a los procesos de carbonización y activación del bambú, se seleccionaron las condiciones adecuadas de temperatura y tiempo para aumentar el rendimiento y la eficiencia de la activación de carbón de bambú
- Las características obtenidas al realizar carbón activado como índice de número de yodo y azul de metileno indicadores utilizados como ensayo para medir la eficiencia demuestra en sus resultados el potencial que puede llegar a tener este carbón activado en comparación con otros carbones.
- Las especificaciones técnicas utilizadas en este proceso de obtención utilizando un balance de masa para medir la eficiencia del proceso reconoce la obtención de un carbón activado de calidad.
- Ante los costos de producción realizados y analizados en esta propuesta se observa que, siendo altos, se puede realizar mecanismos alternativos para la utilización de materiales y equipos para la producción de carbón.

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un análisis químico de mayor profundidad del bambú de la especie *Chusquea Scandens Kunth* para conocer qué otros beneficios a nivel industrial se pueden obtener de la planta además de la producción de carbón activado.
- El carbón activado presentó una eficiencia que compite con lo otros carbones que se encuentran en el mercado y debido a esto se recomienda utilizar para estudios posteriores para solucionar problemáticas como la contaminación de aguas residuales.
- En las especificaciones técnicas del proceso hicieron falta datos para poder realizar el balance de energía del proceso de carbonización y activación para la obtención de carbón activado, se recomienda realizar futuros análisis para determinación de las capacidades y poderes caloríficos específicos del carbón de bambú de la especie.
- Se recomienda realizar una análisis más robusto del mercado que tiene el carbón activado en Colombia para determinar si es viable colocar una planta de producción para distribución a nivel nacional.

BIBLIOGRAFÍA

AGUAPEDIA. Trabajo de grado Máster en Ingeniería del Agua. Manual del Carbón Activado. España: Escuela Politécnica Superior Universidad de Sevilla.

COLOMBIA. LONDOÑO, Ximena. Morfología, taxonomía, anatomía, silvicultura y usos de los bambúes del Nuevo Mundo. *Maestría en Construcción. Módulo Guadua, Arquitectura. En: Rev. Módulo Guadua, Arquitectura. Agosto, 2002. p. 1-25.*

CHAOWANA Pannipa. Bamboo: An Alternative Raw Material for Wood and Wood-Based Composites. En: Rev. Journal of Materials Science Research. Marzo, 2013. vol. 2, No. 2, p. 90-102.

“COMISIÓN NACIONAL DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y TECNOLOGICA. Carbón de Bambú y Productos Derivados, Desarrollo Tecnológico y Comercial. Fondo de Fomento al desarrollo científico y tecnológico. Chile: 2008. Código Fondef D0311011.

DIAZ, Lucia, *et al* A producir Guadua en Cundinamarca. Bogotá, Grafo 'I CAS CORTES LTDA. 2012, p.19.

FARRELLY, David. The Book of Bamboo: A comprehensive guide to this remarkable plant, its uses and its history. 1 ed. Washington: Ed. Springer International Publishing. 2015.

FONDO DE FOMENTO AL DESARROLLO CIENTIFICO Y TECNOLOGICO. Carbón de Bambú y Productos Derivados, Desarrollo Tecnológico y Comercial. Proyecto Fondef de Investigación y desarrollo., 2008. Copia no 1
FONDO DE FOMENTO AL DESARROLLO CIENTIFICO Y TECNOLOGICO. Op.cit., p.11.

GUZMAN, Fernando. Estudio Económico financiero y la Evaluación en proyectos de la industria química. Universidad Nacional de Colombia, 2001. p.26.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC 1486-6166. Bogotá D.C.: El instituto, 1998. ISBN 9789588585673. 153.p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Productos químicos industriales. Carbón activado. Métodos de ensayo. NTC 4467. Bogotá D.C.: El instituto, 1998. ISBN 97895885645678. 28.p.

LOPEZ VALENCIA, Juan Pablo. Desarrollo de un carbón activado granular mediante activación física en un horno rotatorio. Tesis de maestría en Ingeniería química. Bogotá D.C. Universidad nacional de Colombia. 2014. p.10.

MEJIA, Amanda, *et al.* Plantas Del Género Bambusa: Importancia Y Aplicaciones En La Industria Farmacéutica, Cosmética Y Alimentaria. En: *Revista Vitae*. Mayo, 2009.vol.16, no 3, p.398.

MEJÍA GALLÓN, Amanda Inés, *et al.* Identificación de compuestos volátiles del vinagre de *Guadua angustifolia* Kunth. (guadua). En: *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 2011, vol. 16, no 2, p. 190-201. ISSN 1028-4796

MCCLURE, F. The bamboo: A fresh perspective. Citado por LONDOÑO, Ximena. Distribución, morfología, taxonomía, anatomía, silvicultura y usos de los bambúes del Nuevo Mundo. {En línea}. Colombia: *Universidad Nacional de Colombia*.2002,p.5. Disponible en <http://www.hof-landlust.de/scb/taller.html>

MEJÍA GALLÓN, Amanda Inés, *et al.* Identificación de compuestos volátiles del vinagre de *Guadua angustifolia* Kunth.(guadua). En: *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 2011, vol. 16, no 2, p. 190-201. ISSN 1028-4796

PRIAS BARRAGAN, Jhon, *et al.* Identificación de las variables óptimas para la obtención de carbón activado a partir del precursor guadua *ANGUSTIFOLIA KUNTH*. En: *Revista Académica Colombiana de ciencias*, Armenia. Junio, 2011, no. 35 (135). p.157-166. ISSN 0370-3908.

SOTO, Francisco. Evaluación técnico económica de una planta de carbón activado. Chile, Santiago de Chile: Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas departamento de ingeniería industrial. 2007.p.11.

TECHNOLOGIES GROUP, Water Global. Carbon activado granular. México D.F. [en línea]. Disponible en: <http://www.ciberteca.net/equipos-para-purificadoras-y-embotelladoras-de-agua-purificada-y-mineral/medios-filtrantes-de-filtos/carbon-activado.htm>

VALDES,H, Zaror. Influencia de la composición química superficial del carbón activado en la adsorción de benzotiazoles. En: *Revista Chilena de Ingeniería*. Chile. Septiembre, 2010 vol.18, no.1. p.38-43. ISSN 0718-3305

VALAREZO JARAMILLO, Luis. obtención experimental de un material biocompuesto a base de una matriz polimérica y reforzada con fibras naturales de *guadua angustifolia* proveniente del ecuador. Trabajo de grado profesional en Ingeniería Mecánico. Ecuador. Universidad Politécnica Salesiana. Facultad de Ingeniería. 2013.4p.

VALDES,H, Zaror. Influencia de la composición química superficial del carbón activado en la adsorción de benzotiazoles. En: Revista Chilena de Ingeniería. Chile. Septiembre, 2010 vol.18, no.1. p.38-43. ISSN 0718-3305

VELAZQUEZ-TRUJILLO, A.; BOLANOS-REYNOSO, E. y PLIEGO- BRAVO, Y.S. Optimización de la producción de carbón activado a partir de bambú. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. [online]. 2010 vol.9, n.3, p.359. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382010000300010&lng=es&nrm=iso>. ISSN 1665-2738.

WENBIAO, Zhang, et al. Producción y aplicación de carbón de bambú y vinagre de bambú. 1 Ed. Beijing. Editorial Forestal China. 2006. p.99. ISBN 7-5038-4354-3

YANG, Hee Jin. Antifungal activity of nano and micro charcoal particle polymers against *Paecilomyces Variotii*, *Trichoderma Virens* and *Chaetomium Globosum*, En: New biotechnology Journal, Myongji university, Yongin, Corea del sur. Vol. 33. No. 1. Agosto 2016 p.55.

ZHANG, Huiyun. Antioxidant and antimicrobial effects of edible coating based on chitosan and bamboo vinegar in ready to cook pork chops. En: Food and Bioengineering Department Journal, Henan University of Science and Technology. Henan, China: Vol.93. Julio 2018. p.472.

ZUO SONG, Lin. *et al* Carbonization mechanism of bamboo (phyllostachys) by means of Fourier Transform Infrared and elemental analysis. En: Journal of Forestry Research, Marzo, 2003, no 14(1), p. 75-79.

ANEXOS

ANEXO A
FACTOR DE CORRECCIÓN DE YODO PARA PRUEBA DE ÍNDICE DE YODO
EN CARBONES ACTIVADOS SEGÚN NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC
4467. Productos químicos industriales. Carbón activado. Métodos de ensayo

Normali- dad filtrado residual	0,0000	0,0001	0,0002	0,0003	0,0004	0,0005	0,0006	0,0007	0,0008	0,0009
0,008	1,1625	1,1613	1,1600	1,1575	1,1550	1,1533	1,1513	1,1500	1,1475	1,1463
0,009	1,1438	1,1425	1,1400	1,1375	1,1363	1,1350	1,1325	1,1300	1,1288	1,1275
0,010	1,1250	1,1238	1,1225	1,1213	1,1200	1,1175	1,1163	1,1150	1,1138	1,1113
0,011	1,1100	1,1088	1,1075	1,1063	1,1038	1,1025	1,1000	1,0988	1,0975	1,0963
0,012	1,0950	1,0938	1,0925	1,0900	1,0888	1,0875	1,0863	1,0850	1,0838	1,0825
0,013	1,0800	1,0788	1,0775	1,0763	1,0750	1,0738	1,0725	1,0713	1,0700	1,0688
0,014	1,0675	1,0663	1,0650	1,0625	1,0613	1,0600	1,0588	1,0575	1,0563	1,0550
0,015	1,0538	1,0525	1,0513	1,0500	1,0488	1,0475	1,0403	1,0450	1,0436	1,0425
0,016	1,0413	1,0400	1,0399	1,0375	1,0375	1,0363	1,0350	1,0333	1,0325	1,0313
0,017	1,0300	1,0288	1,0275	1,0263	1,0250	1,0245	1,0238	1,0225	1,0208	1,0200
0,018	1,0200	1,0188	1,0175	1,0163	1,0150	1,0144	1,0138	1,0125	1,0125	1,0113
0,019	1,0100	1,0088	1,0075	1,0075	1,0063	1,0050	1,0050	1,0038	1,0025	1,0025
0,020	1,0013	1,0000	1,0000	0,9988	0,9975	0,9975	0,9963	0,9950	0,9950	0,9938
0,021	0,9938	0,9925	0,9925	0,9913	0,9900	0,9900	0,9888	0,9875	0,9875	0,9863
0,022	0,9863	0,9850	0,9850	0,9838	0,9825	0,9825	0,9813	0,9813	0,9800	0,9766
0,023	0,9766	0,9775	0,9775	0,9763	0,9763	0,9763	0,9750	0,9736	0,9736	0,9725
0,024	0,9725	0,9708	0,9700	0,9700	0,9688	0,9688	0,9675	0,9675	0,9663	0,9663
0,025	0,9650	0,9650	0,9638	0,9638	0,9625	0,9625	0,9613	0,9613	0,9606	0,9600
0,026	0,9600	0,9588	0,9588	0,9575	0,9575	0,9563	0,9563	0,9550	0,9550	0,9538
0,027	0,9538	0,9525	0,9525	0,9519	0,9513	0,9513	0,9506	0,9500	0,9500	0,9488
0,028	0,9488	0,9475	0,9475	0,9463	0,9463	0,9463	0,9450	0,9450	0,9438	0,9438
0,029	0,9425	0,9425	0,9425	0,9413	0,9413	0,9400	0,9400	0,9394	0,9388	0,9388
0,030	0,9375	0,9375	0,9375	0,9363	0,9363	0,9363	0,9363	0,9350	0,9350	0,9346
0,031	0,9333	0,9333	0,9325	0,9325	0,9325	0,9319	0,9313	0,9313	0,9300	0,9300
0,032	0,9300	0,9294	0,9288	0,9288	0,9280	0,9275	0,9275	0,9275	0,9270	0,9270
0,033	0,9263	0,9263	0,9257	0,9250	0,9250	-	-	-	-	-