

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**CARACTERIZACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO
A PARTIR DE BAMBÚ "*GUADUA
ANGUSTIFOLIA KUNTH*" UTILIZANDO EL
MÉTODO QUÍMICO**

Presentado por:

Christian Sánchez Montesinos

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO FORESTAL

Lima - Perú
2018

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los Miembros del Jurado que suscriben, reunidos para calificar la sustentación del Trabajo de Tesis, presentado por el ex-alumno de la Facultad de Ciencias Forestales, Bach. **CHRISTIAN SÁNCHEZ MONTESINOS**, intitulado “**CARACTERIZACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE BAMBÚ “*GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH*” UTILIZANDO EL MÉTODO QUÍMICO**”.

Oídas las respuestas a las observaciones formuladas, lo declaramos:

.....

con el calificativo de

En consecuencia queda en condición de ser considerado APTO y recibir el título de INGENIERO FORESTAL.

La Molina, 11 de enero de 2017

Mg. Sc. **Manuel Chavesta Custodio**
Presidente

Mg. Sc. **Leonidas Miguel Castro**
Miembro

Lic. **Elvito Villegas Silva**
Miembro

PhD. **Héctor Enrique Gonzales Mora**
Asesor

Lic. **Deysi Guzman Loayza**
Coasesor

DEDICATORIA

Primero al más grande de los grandes, nuestro padre Dios, porque siempre acompaña mis pasos donde quiera que este y lo que haga; a mi esposa Ivhy que sin su apoyo y paciencia me facilitó el trabajo al momento de concluir mi investigación, sin lugar a duda eres el gran amor de mi vida y la fuerza que Dios me envió, a mi madre Nora por su apoyo moral y su confianza en mí siempre, a mi padre Calvin por sus sabios consejos y apoyo económico, a mis hermanos Henry y Mónica por sus consejos y empuje.

AGRADECIMIENTOS

A mi patrocinador Dr. Enrique Gonzáles Mora y a la Lic. Deysi Guzmán por su paciencia y dirección profesional.

A mis amigos Cecilia, Roberto, Katia, Fiorella, Diana, Karin, Richi, Jorge, Lucho, Lenka, Marilú, Pedro, Yessenia, Arturo, Meche, Betty y Patricia por su apoyo consejos y guías durante el desarrollo de la tesis y después de esta.

“Caminante no hay camino se hace camino al andar”

“Sabio, que nunca te humillas y estudias, para negarlas, las divinas maravillas, a Dios se va de rodillas y tú no sabes doblarlas” dedicado a un gran educador de la vida como es el Hermano Alberto Peinador del colegio La Salle de Lima.

“Vive aunque sea un poco fuera de tu zona de confort, presiónate hasta que llegues más lejos de lo que creíste que llegarías”

RESUMEN

En la presente investigación se estudió la obtención de carbón activado por medios químicos a partir de residuos generados del aprovechamiento del bambú como son los tallos defectuosos, desechos de ramas y partes terminales superiores de la *Guadua angustifolia* Kunth. Se realizó el análisis de los carbones activados obtenidos y se determinó la influencia de las variables (factores): temperatura (500 y 700°C), tiempo de activación (60 y 90 minutos) y concentración de H₃PO₄ (25 y 50 por ciento) sobre las propiedades de los carbones ensayados. Se evaluó la capacidad de adsorción de los carbones activados obtenidos, mediante la prueba del azul de metileno conocida por su excelente adsorción de sólidos que con frecuencia sirve de modelo para la eliminación de contaminantes orgánicos y colorantes en soluciones acuosas. Los carbones activados con mayor poder de adsorción y por consiguiente con una mayor área superficial fueron la muestra M 8 (carbón activado en polvo) y la muestra M 16 (carbón activado granular), ambos obtenidos con un 50 por ciento de concentración de agente activante empleando un tiempo de activación de 90 minutos y a una temperatura constante de 700°C. Estos carbones presentaron las siguientes propiedades físico-químicas: contenido de humedad 18,54% (M 8) y 26,70% (M 16); material volátil 11,15% (M8) y 12,57% (M 16); contenido de cenizas 35,70 (M 8) y 27,39 (M 16); carbono fijo 53,15% (M8) y 60,04% (M 16); potencial de hidrógeno (pH) 2,74 (M 8) y 2,81 (M 16) y densidad aparente (g/cm³) 0,56 (M 8) y 0,30 (M 16). Según los resultados obtenidos se demostró que a partir de residuos generados del aprovechamiento del bambú como son los tallos que sean defectuosos, desechos de ramas y partes terminales superiores de la *Guadua angustifolia* Kunth, es posible obtener un carbón activado de buena calidad y potencial para ser aprovechada para la industria.

Palabras claves: Bambú, guadua, temperatura, tiempo de activación, concentración, muestras

ÍNDICE GENERAL

	Página
I. Introducción	1
II. Revisión de Literatura	3
1. De la especie estudiada	3
1.1. Características generales - bambú <i>Guadua angustifolia</i> Kunth.....	3
1.2. Distribución y hábitat de la <i>Guadua angustifolia</i> Kunth	5
1.3. Nombres comunes de la <i>Guadua angustifolia</i> Kunth.....	7
1.4. Mercado y producción nacional del carbón activado.....	7
1.5. Características específicas de la especie bambú <i>Guadua angustifolia</i> Kunth	8
1.6. Clasificación - <i>Guadua angustifolia</i> Kunth	9
1.7. Características de la <i>Guadua angustifolia</i> Kunth	9
1.8. Crecimiento de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth	10
1.9. Propagación de la especie	12
1.10. Cultivo y aprovechamiento de la especie.....	12
1.11. Propiedades anatómicas del bambú	13
1.12. Propiedades químicas	14
1.13. Propiedades fisicomecánicas.....	15
1.14. Análisis y evaluación comparativa de dos especies del género <i>Guadua</i>	15
1.15. Potencial de usos del bambú, según la especie	16
2. Carbón vegetal	17
3. Carbón activado	18
3.1. Usos del carbón activado	20
4. Carbonización o pirólisis	22
5. Proceso de activación	24
6. Clasificación del carbón activado	26
6.1. Método de obtención del carbón activado	28
7. Agente activante. Ácido fosfórico (H₃PO₄) y cloruro de zinc (ZnCl₂)	31
III. Materiales y Métodos	33
1. Características de la zona muestral	33
1.1. Descripción de la Florida- Cajamarca	33
1.2. Suelos y Ecología del punto de recolección de muestra	33
2. Selección de la matriz	34
3. Lugar de análisis	36
4. Materiales usados	36
4.1. Materiales de laboratorio usados.....	36
4.2. Equipos usados.....	36
4.3. Reactivos químicos usados.....	37
5. Metodología	38
5.1. Carbonización - activación	40
5.2. Lavado y filtrado	41
5.3. Secado.....	41
5.4. Molienda, tamizado y acondicionamiento.....	42
6. Evaluación del carbón activado elaborado	42
7. Diseño estadístico	43
IV. Resultados y discusión	45
1. Características del carbón activado obtenido	45

1.1.	Características del carbón activado obtenido.....	45
2.	Análisis de las características del carbón activado obtenido	46
2.1.	Rendimiento de la activación.....	46
2.2.	Densidad aparente (g/cm ³).....	48
2.3.	Contenido de humedad (CH%).....	51
2.4.	Material volátil (MV%).....	53
2.5.	Contenido de cenizas (CZ%).....	55
2.6.	Carbono fijo (CF%).....	57
2.7.	Adsorción del azul de metileno (Ads%).....	59
2.8.	pH.....	61
3.	determinación de calidad del carbón activado obtenido	65
V.	Conclusiones	67
VI.	Recomendaciones	69
VII.	Referencias bibliográficas	71
VIII.	Anexos.....	77

Índice de tablas

	Página
Tabla 1:	Lista de nombre del bambú por región..... 7
Tabla 2:	Importación de carbón activado en el Perú. 8
Tabla 3:	Clasificación y detalle de especie. 9
Tabla 4:	Características de la especie <i>Guadua angustifolia</i> Kunth..... 10
Tabla 5:	Propiedades mecánicas del bambú 15
Tabla 6:	Composición de dos especies del género <i>Guadua</i> 15
Tabla 7:	Uso del bambú..... 16
Tabla 8:	Métodos de activación según la materia prima 25
Tabla 9:	Serie de mallas ASTM (utilizadas para tamizado)..... 26
Tabla 10:	Propiedades del carbón activados 27
Tabla 11:	Ventajas y desventajas de los métodos de activación 30
Tabla 12:	Activación física..... 30
Tabla 13:	Activación química 30
Tabla 14:	Exportación de carbón activado..... 32
Tabla 15:	Diseño experimental de los tratamientos empleados para la elaboración de carbón activado, por el método químico. 44
Tabla 16:	Resultado de las variables de evaluación de los carbones activados 45
Tabla 17:	Rendimiento y grado de activación de los carbones experimentados 46
Tabla 18:	Evaluación de los carbones activados obtenidos en el presente estudio de acuerdo a la norma NMX-295-1981..... 65

Índice de figuras

	Página
Figura 1: Producción de Bambú <i>Guadua angustifolia</i> Kunth.	3
Figura 2: Importancia del bambú para el ecosistema La Florida, Cajamarca.	5
Figura 3: Distribución del bambú en el Perú (Nativo y cultivo).	6
Figura 4: Esquema de crecimiento del bambú.	11
Figura 5: Descripción de una caña de bambú	12
Figura 6: Corte longitudinal del culmo de <i>Guadua angustifolia</i>	14
Figura 7: Distribución de las materias primas del carbón activado.	18
Figura 8: Esquema de los principales grupos funcionales que pueden encontrarse en un carbón activado.	20
Figura 9: Usos del carbón activado	21
Figura 10: Distribución porosa al interior del carbón activado.	22
Figura 11: Esquema básico del proceso de la carbonización.	24
Figura 12: Lugar de colección de la muestra.	33
Figura 13: Utilización integral del bambú.	35
Figura 14: Diagrama de la metodología aplicada para la obtención de carbón activado y sus evaluaciones	38
Figura 15: Acondicionamiento de materia prima en el laboratorio.	39
Figura 16: Corte y acondicionamiento de materia prima.	39
Figura 17: Impregnación del material precursor.	40
Figura 18: Impregnación de la materia prima y reposo de 24 horas.	40
Figura 19: Carbonización - Activación del carbón activado en polvo.	41
Figura 20: Carbonización - Activación del carbón activado granular.	41
Figura 21: Calentar agua destilada a 95°C.	41
Figura 22: Echar agua destilada caliente al carbón activado para lavar.	41
Figura 23: Porcentaje de rendimiento.	47
Figura 24: Gráfica de efectos principales para Rendimiento.	48
Figura 25: Densidad aparente.	50
Figura 26: Gráfica de efectos principales para densidad aparente.	51
Figura 27: Porcentaje de contenido de humedad.	52
Figura 28: Gráfica de efectos principales para contenido de humedad.	53
Figura 29: Porcentaje de material volátil.	54

Figura 30:	Gráfica de efectos principales para material volátil.	55
Figura 31:	Porcentaje de cenizas.	56
Figura 32:	Gráfica de efectos principales para contenido de cenizas.	57
Figura 33:	Porcentaje de carbono fijo.....	58
Figura 34:	Gráfica de efectos principales para carbono fijo.	59
Figura 35:	Porcentaje de adsorción del azul de metileno.....	60
Figura 36:	Gráfica de efectos principales para adsorción de azul de metileno.	61
Figura 37:	Nivel de pH.....	62
Figura 38:	Gráfica de efectos principales para lectura pH.....	64

Índice de anexos

	Página
Anexo 1 Análisis de varianza para el rendimiento.	77
Anexo 2 Análisis de varianza para la densidad aparente.....	78
Anexo 3 Análisis de varianza para la humedad.....	79
Anexo 4 Análisis de varianza para el material volátil.	80
Anexo 5 Análisis de varianza para cenizas.....	81
Anexo 6 Análisis de varianza para el material volátil.	82
Anexo 7 Análisis de varianza para absorción de azul de metileno.	83
Anexo 8 Análisis de varianza para lectura de PH.....	84
Anexo 9 NMX-F-295-1981. Alimentos para uso humano. Azúcar. Determinación de la calidad de carbones activados empleados en la refinación de azúcar. Foods for human use. Normas mexicanas. Dirección general de normas. Prefacio.	85

I. INTRODUCCIÓN

En el mundo la demanda de carbón activado es creciente, se exportó en el mercado mundial US \$ 2 325' millones para el año 2013, con un crecimiento anual en valor del 8 por ciento en el periodo 2009-2013, teniendo a China, EE.UU., Alemania, Países Bajos (Holanda), Reino Unido y Bélgica, con más del 50 por ciento del posicionamiento del mercado mundial de las exportaciones en el periodo 2009-2013 (ITC 2014).

En el Perú, el carbón activado fue un producto de gran demanda para el periodo 2008-2012 para la industria nacional minera, alimentaria y química entre otras para lo cual importó un total 48 037 TM (ITC 2014).

En la actualidad, el carbón activado es utilizado por diversas industrias, a nivel nacional e internacional, aplicándolo como decolorante, desodorizante o eliminación de sabores en diferentes medios de tratamientos, para obtener diversos productos de los carbones activados de origen vegetal, el carbón de bambú sobresale por su alta capacidad de adsorción. Diversas fuentes de información destacan valores de superficie de adsorción por gramo de carbón de bambú que llegan a duplicar los valores registrados para el carbón producido a partir de algunas especies madereras (Bambú en Chile 2003).

Tenemos pues que de las especies de bambú reportadas en el Perú, destaca la *Guadua angustifolia* Kunth, que es utilizada en construcción, por sus características físicas, mecánicas. Esta especie presenta un rápido crecimiento de 5 a 6 años para lograr su madurez. Desde el punto de vista económico, este aspecto es una gran ventaja comparativa (Lozada 2012).

En la cuenca del río Zaña, distrito de La Florida, provincia de San Miguel, departamento de Cajamarca, existen 400 hectáreas de bambú o también llamada caña Guayaquil, que han sido plantadas en tierras de los comuneros de la zona desde hace décadas y continúan haciéndolo; además vienen siendo utilizadas, manejadas y comercializadas. Producto de este aprovechamiento se genera desperdicio (residuos) el cual queda en la zona y no es utilizado.

La presente investigación tiene como finalidad la utilización de residuos generados del aprovechamiento del bambú como son los tallos (también llamados culmos) que sean defectuosos, desechos de las ramas y partes terminales superiores de *Guadua angustifolia* Kunth, como materia prima para la obtención de carbón activado, mediante el método químico. De esta forma, se busca contribuir con información de la materia prima que sirva de base para el desarrollo de actividades de transformación con productos diferentes a la madera provenientes de distintas partes del territorio peruano.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

1. DE LA ESPECIE ESTUDIADA

1.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES - BAMBÚ *GUADUA ANGUSTIFOLIA* KUNTH

En 1822 el botánico alemán Karl S. Kunth determinó que la *Guadua* (ver figura 01) (manteniendo así el vocablo que utilizaban las comunidades indígenas) constituye el género de bambú más importante de América, endémico de este continente y formado por unas 30 especies (Añazco 2014).



Figura 1: Producción de Bambú *Guadua angustifolia* Kunth.

FUENTE: Elaboración propia.

Existen 90 géneros y 1 250 especies de bambú, los cuales se encuentran distribuidos de la siguiente manera: 63 por ciento en Asia, 32 por ciento en América y 5 por ciento en África y Oceanía. El bambú se desarrolla en todos los continentes con excepción de Europa;

encontrándose principalmente en los países de clima tropical, subtropical; pero también en climas templados y fríos, desde el nivel del mar hasta los 4 000 metros (MINAG 2008).

Pueden crecer como plantas aisladas dentro del bosque, entre la diversidad de árboles, o a orillas de los ríos. También formar grandes “manchales” e incluso bosques de bambúes (Olivier 2008).

El conjunto de estas especies forman denominado Guaduales como se observa en la Figura 02. Estas formaciones son de gran importancia al ecosistema en estas regiones gracias a que:

- Crean ecosistemas dinámicos altamente especializados (sustenta gran cantidad de vida en su interior);
- Se comportan como grandes Reguladores del caudal hídrico (absorbiendo agua cuando hay exceso y proveyendo siempre evitando posibles crecidas);
- Previenen la erosión del terreno y la deforestación (gracias a sus ramificaciones subterráneas);
- Aportan gran cantidad de biomasa al terreno donde se desarrollan y finalmente son los mayores fijadores de CO ambiental del planeta (registros entre 100 y 150 toneladas por hectárea por ciclo de vida).



Figura 2: Importancia del bambú para el ecosistema La Florida, Cajamarca.

FUENTE: Elaboración propia.

1.2. DISTRIBUCIÓN Y HÁBITAT DE LA *GUADUA ANGUSTIFOLIA* KUNTH

La guadua constituye el género de bambú nativo más importante de América tropical, es endémica de este continente, con aproximadamente 30 especies distribuidas desde México hasta Argentina, exceptuando Chile y las Islas del Caribe, la guadua crece en todos los países de Iberoamérica y en buena parte de los países asiáticos (Añazco 2015). Es considerada el tercer bambú más grande del mundo, superada únicamente por dos especies asiáticas. La guadua es una gramínea gigante que puede alcanzar 30 metros de altura o más y cuyo diámetro puede variar de uno a 22 centímetros (Hidalgo 2003). La *Guadua angustifolia* es la especie nativa más importante de Colombia. Fue identificada primero por los botánicos Humboldt y Bonpland como *Bambusa guadua*, posteriormente en 1822 el botánico alemán Karl S. Kunth identifica el género *Guadua*, haciendo uso del vocablo indígena “guadua”, con el que lo identificaban las comunidades indígenas de Colombia y Ecuador. Kunth rebautiza la especie con el nombre de *Guadua angustifolia*, que significa “hoja angosta” (Añazco 2014).

Los bambúes leñosos de la subfamilia Bambusoideae están ampliamente distribuidos a través de los trópicos, específicamente los del género *Guadua*, en las regiones bajas de América Latina. Se le encuentra desde el norte de Perú, a través de Ecuador, Colombia y América Central hasta el sur de México, generalmente cerca de cursos de agua; alcanza su

clímax ecológico en Colombia y Ecuador en las llanuras húmedas tropicales, bosque tropical montano bajo, bosque semidecíduo, decíduo (Pérez 2014).

La *G. angustifolia* es endémica de América y se considera como nativa de Colombia, Venezuela y Ecuador. También fue introducida en México en 1995 (procedente de viveros de Colombia) y en varios países centroamericanos: Isla del Caribe, Hawái y Asia. La *Guadua angustifolia* se desarrolla muy bien entre los 0 y 1 600 metros, pero también crece en buenas condiciones hasta los 1 800 msnm, por encima de esta altura hasta los 2 000 m, los rendimientos son más bajos (Añazco 2015).

En el Perú existen 45 especies de bambúes leñosos nativos y se distribuyen en los departamentos de Amazonas, Arequipa, Cajamarca, Cusco, Huancavelica, Huánuco, Ica, Junín, La Libertad, Loreto, Moquegua, Pasco, Puno, San Martín y Tacna. Así como plantaciones de la especie *Guadua angustifolia* y exóticos *Bambusa vulgaris* (ver Figura 03) (Takahashi *et al.* 2003).

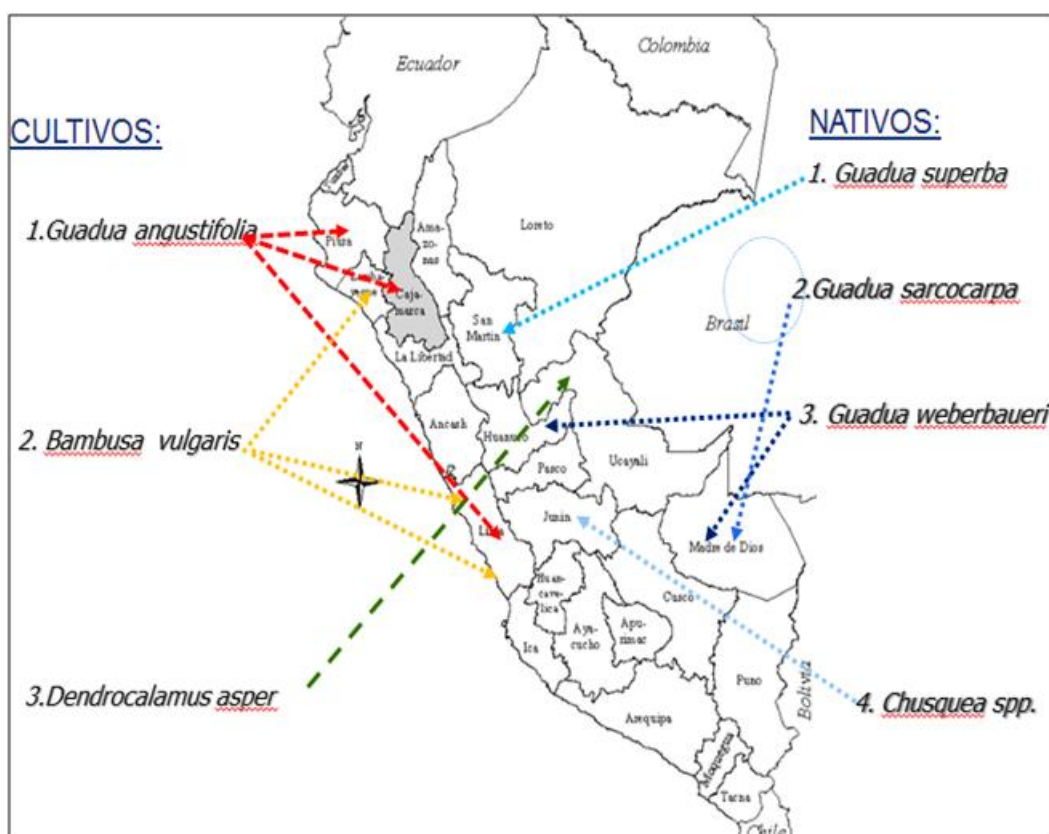


Figura 3: Distribución del bambú en el Perú (Nativo y cultivo).

FUENTE: Sociedad Peruana del Bambú (2006).

1.3. NOMBRES COMUNES DE LA *GUADUA ANGUSTIFOLIA* KUNTH

Tabla 1: Lista de nombre del bambú por región.

<i>País</i>	<i>Nombres regionales</i>
Argentina y Brasil	: taboca y tacuara
Perú	: paca o caña de Guayaquil
Amazonia	: yariipa
Ecuador	: caña guadua, caña mansa, caña brava
Colombia	: guadua
Costa Rica	: guadua
Venezuela	: Jua-jua, Puru-puru

FUENTE: Pérez (2014).

1.4. MERCADO Y PRODUCCIÓN NACIONAL DEL CARBÓN ACTIVADO

Es de interés del presente estudio adentrar en el análisis de mercado Nacional de carbón activado. Para ello, analizamos los precios FOB (precio en puerto receptor) de exportación de carbones vegetales, donde salta la variación en función al país de despacho, siendo de US\$ 223 /tonelada de acuerdo a estadísticas de FAO (2008).

Así mismo el precio FOB para el carbón de bambú alcanza a US\$ 450/tonelada. Los precios de exportación oscilan entre los US\$ 800/tonelada FOB hasta los US\$ 14 000 /tonelada estimándose un valor promedio de US\$ 4 000 a US\$ 5 000 (Bambú en Chile 2003).

En el Perú, como se muestra en el cuadro 02, la importación de carbón activado en el periodo 2008-2012 ha venido en aumento teniendo como principales importadores a E.E.U.U, México, Alemania, Sri Lanka, Brasil y Corea entre otros. (SUNAT 2014).

Además, se sabe que las marcas comerciales más consumidas en el país son: NORIT, DARCO - S51, NUCHAR, CALGON, CLARIMEX, MERCK entre otras marcas, las que ofrecen básicamente carbón activado granular y carbón activado pulverizado o en polvo.

Tabla 2: Importación de carbón activado en el Perú.

<i>Año</i>	<i>Peso Neto (kg)</i>	<i>CIF \$</i>
2008	2 071 520	3 677 301
2009	2 845 105	4 726 044
2010	2 130 540	4 073 945
2011	2 471 722	4 919 354
2012	2 801 013	6 887 962
2008 – 2012	12 319 900	24 284 606

FUENTE: SUNAT (2014).

1.5. CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DE LA ESPECIE BAMBÚ *GUADUA ANGUSTIFOLIA* KUNTH

La especie guadua es un bambú gigante, espinoso, con culmos erectos que alcanzan alturas hasta de 25 metros y diámetros que van desde los 10 hasta 25 centímetros según el hábitat en el que se desarrollen (suelo, clima, nivel altitudinal, etc.). El tiempo que tarda en desarrollarse varía entre 4 y 5 años (Mercedes 2003).

Es una planta de hábito perenne y rápido crecimiento, con rizomas generalmente bien desarrollados, en él se almacenan los nutrientes y permite la propagación asexual al separar una de sus ramificaciones; los tallos o culmos son siempre lignificados y fuertes, cilíndricos y rectos, formados por nudos y entrenudos cuyas paredes tienen hasta dos centímetros de espesor; las hojas son lanceoladas, lisas y presentan un pseudopeciolo en ellas (Mercedes 2003).

La inflorescencia en panícula, generalmente florecen en forma gregaria, pero también es común la floración esporádica o anual o incluso bianual, no existe relación entre la floración y la edad, diámetro del tallo, condiciones agronómicas, clima. Los frutos en algunas especies, incluso dentro del mismo género, pueden ser carnosos. En general las semillas germinan rápidamente, pero pueden conservarse por un periodo que varía entre tres meses a dos años (MINAG 2008).

1.6. CLASIFICACIÓN – *GUADUA ANGUSTIFOLIA* KUNTH

Tabla 3: Clasificación y detalle de especie.

Nº	Clasificación	Detalle de la especie
1	Reino	Vegetal
2	División	Espermatofita
3	Subdivisión	Angiospermae
4	Clase	Lilopsidas/Monocoltiledoneae
5	Subclase	Commelinidae
6	Orden	Cyperales/Glumiflorales
7	Familia	Gramineae o Poaceae
8	Subfamilia	Bambusoideae
9	Tribu	Bambuseae
10	Subtribu	Guaduinae
11	Género	Guadua
12	Especie	Angustifolia
13	Variedades	Bicolor y nigra

FUENTE: Forero et al. (2007).

1.7. CARACTERÍSTICAS DE LA *GUADUA ANGUSTIFOLIA* KUNTH

Múltiples estudios sostienen que existen algunos factores que se deben tener en consideración para determinar la calidad del bambú como son: los factores climáticos (lluvia, temperatura, humedad), factores edafológicos (suelo) y factores silviculturales (vegetación altas y bajas) (Lozada 2012) con las siguientes características (ver Tabla 04):

- **Factor climáticos:** La temperatura ideal para el cultivo de la *Guadua angustifolia* está entre los 20 a 30°C. A medida que se aleja del rango indicado los diámetros y alturas se reducen. Según la variedad, soporta desde selva tropical hasta los 30°C bajo cero (Gonzales 2007). Temperaturas menores a 18°C afectaría significativamente su desarrollo (CORPEI-CBI 2003).

La guadua se desarrolla en áreas donde la precipitación está en el rango de 2 000 a 2 500 mm anuales, en rango menor a los 1 000 mm podría tener dificultades durante su desarrollo, ya que no puede soportar periodos muy largos sin agua. Como humedad relativa ideal se da entre los 75 por ciento a 80 por ciento (CORPEI-CBI 2003).

- **Factores edafológicos:** Suelo franco arcilloso y con buen drenaje, aun cuando también se encuentran en los lechos húmedos de cursos de agua y suelos arenosos (MINAG 2008); ricos en materia orgánica. Húmedos y con buen drenaje son los más aconsejados para el cultivo. Los suelos pesados o arcillosos no favorecen al desarrollo de la planta (CORPEI-CBI 2003).

Tabla 4: Características de la especie *Guadua angustifolia* Kunth

Nº	Características	Detalle de la especie
1	Nativa de	Colombia la más importante de su tipo (debido a sus extraordinarias propiedades físico-mecánicas, al avance en el estudio silvicultura estructural).
2	Estadio natural	Mayormente en Ecuador a Venezuela entre los 0 y 2 000 m.s.n.m.
3	Características de la región	Central de los Andes, conocida como el eje cafetero Colombiano.
4	Crecimiento	15 a 20 m en 120 días.
5	Desarrollo óptimo	La planta alcanza entre los 500 y 1 500 metros.
6	Diámetro máximo	20 cm.
7	Aprovechamiento	Entre 4 a 5 años.
8	Altitud ideal	Entre los 400 y 1 200 m.s.n.m.
9	Temperatura optima	Se desarrolla de mejor manera entre 17 a 26°C.
10	Precipitaciones	De 1 200 a 2 500 mm/año.
11	Humedad relativa	De 80 al 90%.
12	Suelos	Con fertilidad moderada y buen drenaje.

FUENTE: Gonzáles (2005).

1.8. CRECIMIENTO DE *GUADUA ANGUSTIFOLIA* KUNTH

La especie, por ser una monocotiledónea carente de tejido de cambium, emerge del suelo con su diámetro establecido y según las condiciones climática pueden alcanzar a tener 18 cm. de diámetro y 20 a 30 metros de altura final. Crecen estrepitosamente los 6 primeros meses el resto de años contribuirá con las variables anteriormente detalladas.

Durante la maduración las varas se consolidan, adquiriendo sus características de dureza, flexibilidad y resistencia. En un periodo de 4 a 5 años (ver Figura 04), el culmo alcanza su tamaño final, periodo en el cual también termina su maduración y se puede cosechar.

Posteriormente se puede realizar múltiples cosechas cada dos años hasta un máximo de 120 años (Gonzales 2007).

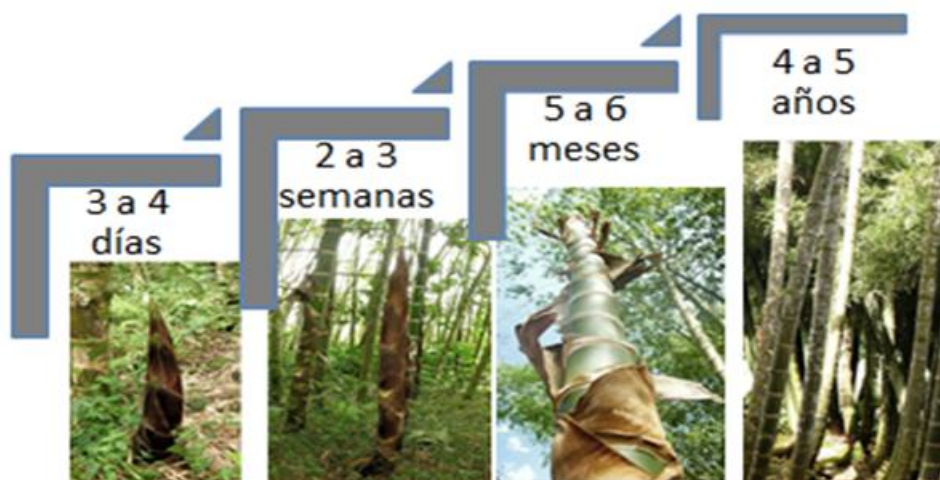


Figura 4: Esquema de crecimiento del bambú.

FUENTE: Gonzales (2007).

El bambú *Guadua angustifolia* Kunth, posee culmos robustos, rectos y espinos, 2 bandas de pelos blancos en ambos lados del nudo, hojas caulinares en forma triangular, es de regeneración permanente y progresiva con un manejo adecuado (ver Figura 05). Características que hacen de la especie un insumo ventajoso para la obtención de mayor cantidad de carbón activado.

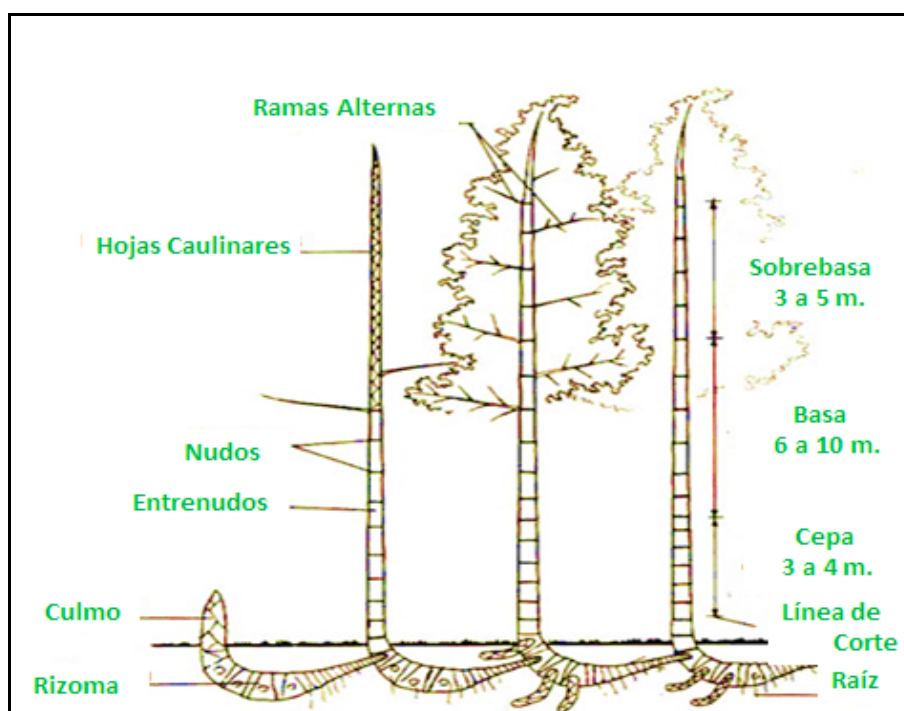


Figura 5: Descripción de una caña de bambú

FUENTE: Salas (2006).

1.9. PROPAGACIÓN DE LA ESPECIE

Debido a que la floración de la *Guadua* es esporádica y no obedece a ciclos uniformes la propagación sexual es muy difícil. Por eso la propagación asexual es la más recomendable en este caso y consiste en utilizar las ramas y rebrotes (Chusquines y matambas) (CORPEI-CBI 2003).

El primero es el más efectivo debido a que se puede masificar, da buen material vegetal, y es de rápida y económica aplicación. Los chusquines se pueden sembrar directamente en el campo o sembrarlos primero en viveros para luego llevarlos a campo definitivo (CORPEI-CBI 2003).

1.10. CULTIVO Y APROVECHAMIENTO DE LA ESPECIE

El establecimiento de plantaciones como bosque productor aprovechable, se recomienda distancias de siembra de 5 x 5 metros de distancia entre plántulas, y para plantaciones como bosque protector de suelos y cuencas, siempre en triángulo a 3 x 3 x 3 metros de distancia entre plántulas (MINAG 2011). El mejor sistema para determinar una fertilización óptima es realizando un análisis de suelo. Una vez realizado el análisis foliar, se determina una dosis a

aplicar en relación con la disponibilidad versus requerimientos. Generalmente la caña requiere altas concentraciones de Nitrógeno (CORPEI-CBI 2003).

Por lo general, el ciclo de crecimiento de un bambú constituye una tercera parte del ciclo de un árbol de rápido crecimiento, y su productividad por hectárea es dos veces la del árbol. La productividad por hectárea de ésta especie es de 1 200 – 1 350 culmos/ha/año (Lozada 2012).

La importancia del cultivo e industria del bambú en el mercado externo es bastante importante ya que más de la mitad de la humanidad lo viene utilizando a diario; porque representa una alternativa viable ante materiales más costosos. El mercado mundial del bambú supera los diez mil millones de dólares anuales, con un potencial de crecimiento de 20 mil millones al 2015 (MINAG 2008).

1.11. PROPIEDADES ANATÓMICAS DEL BAMBÚ

Las propiedades de los culmos de bambú están determinadas por su estructura anatómica y son estas las que reflejan el uso final de este material. La composición de tejidos en un culmo de *Guadua angustifolia* es 40 por ciento fibra, 51 por ciento parénquima y 9 por ciento tejido conductivo. El contenido de fibras es más alto en el segmento apical (56 por ciento) que en el segmento medio (26 por ciento) y basal (29 por ciento) comparativamente con otros bambúes tropicales y subtropicales, la presente especie presenta un porcentaje de fibra relativamente alto y un mayor contenido de sílice en la epidermis, lo que explica sus propiedades de resistencia y flexibilidad (ver Figura 06) (Lozada 2012).

Las características anatómicas de los culmos de bambú tienen un valor considerable para la identificación taxonómica ya que existen diferencias en la estructura de los haces vasculares entre géneros y entre especies, observándose además que los haces vasculares se caracterizan por su forma, tamaño y agrupamiento. Las propiedades de los culmos de bambú están determinadas por su estructura anatómica y son las características anatómicas del culmo las que en últimas reflejan el uso final de este material. Por ejemplo, las propiedades mecánicas del culmo están determinadas por la gravedad específica la cual depende principalmente del contenido y diámetro de la fibra y del espesor de las células de la pared de la fibra o en la industria de pulpa para papel, la longitud de la fibra es importante en la evaluación técnica de materiales leñosos, y el espesor de la pared de la fibra predetermina

las características de la pulpa, la permeabilidad y la calidad del papel (Latif & Liese citado por Londoño *et al.* 2002).

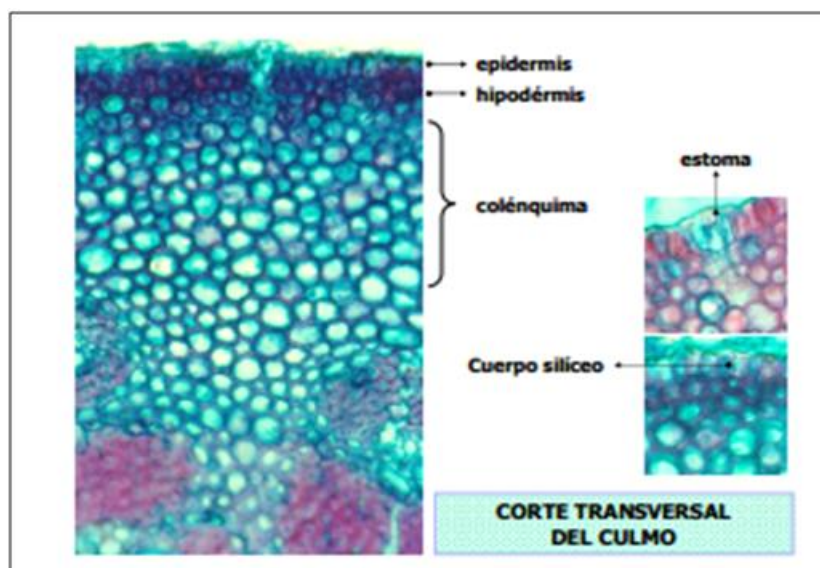


Figura 6: Corte longitudinal del culmo de *Guadua angustifolia*

FUENTE: Londoño *et al.* (2002).

La estructura anatómica del culmo está principalmente determinada por los haces vasculares colaterales embebidos en el tejido del parénquima. La forma, tamaño, número y concentración de haces vasculares varía desde la periferia hacia la parte interna del culmo y desde la base del culmo hacia el ápice del mismo. Cerca de la periferia los haces vasculares son pequeños, numerosos y concentrados mientras que en la parte media del culmo son más grandes y con una distribución más amplia. En todos los bambúes el tamaño de los haces vasculares decrece notoriamente desde la base hacia el ápice pero su densidad se incrementa correspondientemente (Grosser & Liese citado por Londoño *et al.* 2002).

1.12. PROPIEDADES QUÍMICAS

Con relación a la composición química, el porcentaje de holocelulosa y celulosa tiende a decrecer en bambúes mayores de un año, mientras que el contenido de lignina permanece estable o se incrementa ligeramente. Con relación a las propiedades de dureza del culmo se ha establecido que la lignificación se consigue en los primeros estados de desarrollo sin observarse incrementos con la edad. Estudios realizados indican que la composición de las cenizas cambia notablemente entre culmos de uno (1) y siete (7) años, observándose una disminución en los contenidos de cobre, zinc, fósforo, hierro y potasio y un incremento en calcio, magnesio y manganeso (Londoño *et al.* 2002).

1.13. PROPIEDADES FISICOMECÁNICAS

El tallo de Guadua es ligero y flexible y tiene una estructura física que proporciona alta resistencia con relación a su peso como se muestra en la Tabla 05.

Tabla 5: Propiedades mecánicas del bambú

PROPIEDADES MECÁNICAS	(kg/cm²)
Resistencia a la compresión	825
Resistencia a la flexión	856
Módulo de elasticidad	203 879
Resistencia a la tensión	2 038 - 3 058
Relación de rigidez E/M	340

FUENTE: Torres et al. (2008).

1.14. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN COMPARATIVA DE DOS ESPECIES DEL GÉNERO GUADUA







Tabla 6: Composición de dos especies del género Guadua

Especie		Guadua angustifolia	Guadua sarcocarpa
Materia Prima (MP)		Tallo	Tallo
Densidad aparente	g/cm ³	0,65	0,79
Celulosa	%	54,00	53,80
Lignina	%	22,70	25,70
Carbohidratos	%	71,16	64,87
Cenizas	%	5,85	6,25

FUENTE: Gonzales (2002).

1.15. POTENCIAL DE USOS DEL BAMBÚ, SEGÚN LA ESPECIE

Tabla 7: Uso del bambú

Línea de Uso	Especie de Bambú	Imagen referencial
a) Para construcción:	<i>Guadua superba</i> , <i>Chusquea sp.</i> , <i>Dendrocalamus asper</i> , <i>Guadua angustifolia</i> .	
b) Pulpa para papel:	<i>Bambusa vulgaris</i> , <i>Guadua angustifolia</i> .	
c) Tableros aglomerados:	<i>Bambusa vulgaris</i> , <i>Guadua angustifolia</i> , <i>Dendrocalamus asper</i> .	
d) Recuperación de áreas degradadas:	<i>Guadua angustifolia</i> , <i>Dendrocalamus asper</i> , <i>Bambusa vulgaris</i> .	
e) Muebles:	<i>Chusquea sp.</i> , <i>Bambusa vulgaris</i> , <i>Phyllostachys aurea</i> , <i>Guadua angustifolia</i> .	
f) Artesanías:	<i>Chusquea sp.</i> , <i>Merostachys sp.</i> , <i>Arthrostylidium sp.</i> , <i>Rhipidocladum sp.</i> , <i>Elytostachys sp.</i> , <i>Bambusa vulgaris</i> . Tejido Artesanal: <i>Bambusa vulgaris</i> .	
g) Forraje:	<i>Chusquea sp.</i> , <i>Guadua angustifolia</i> ; <i>Bambusa vulgaris</i> .	
h) Ambiental:	<i>Phyllostachys aurea</i> , <i>Bambusa vulgaris</i> ; <i>Guadua angustifolia</i> .	
i) Estabilización de suelos y ribera de los ríos:	<i>Guadua superba</i> , <i>Guadua angustifolia</i> , <i>Dendrocalamus asper</i> .	
j) Industrias alimentarias:	<i>Guadua angustifolia</i> . El ápice de los tallos tiernos (brotes) de algunas especies de bambú, además de ser comestibles y succulentos, son nutritivos, con alto contenido de fibras y bajo en grasas.	
k) Biocombustible:	Para el rubro de los biocombustibles (energía eléctrica) están incluidas todas las especies de bambú sean nativas y exóticas, con oportunidades de mercado regional, nacional e internacional.	

FUENTE: Elaboración propia

2. CARBÓN VEGETAL

La carbonización en el horno, es secar la madera a 100°C, o menos, hasta un contenido cero de humedad se aumenta luego la temperatura de la madera secada al horno a alrededor de 280°C. La energía para estas etapas viene de la combustión parcial de parte de la madera cargada en el horno o en la fosa, y es una reacción que absorbe energía o endotérmica. Cuando la madera está seca y calentada a alrededor de 280°C, comienza espontáneamente a fraccionarse, produciendo carbón más vapor de agua, mañanas, ácido acético y compuestos químicos más complejos, fundamentalmente en la forma de alquitranes y gases no condensables, que consisten principalmente en hidrógeno, monóxido y bióxido de carbono. Se deja entrar aire en el horno o fosa de carbonización para que parte de la madera se quemé, y el nitrógeno de este aire estará también presente en el gas. El oxígeno del aire será gastado en la quema de parte de la madera, arriba de la temperatura de 280°C. libera energía, por lo que se dice que esta reacción es exotérmica (FAO 1983). Este proceso es un tipo de pirólisis con temperaturas desde 400 hasta 600°C y tiempos que varían desde horas hasta días (Márquez citado por Prías *et al.* 2011).

La carbonización de materiales lignocelulósicos implica una serie de reacciones tales como depolimerización, craqueo y deshidratación de lignina y celulosa, en la que se retira la materia volátil liberando elementos (principalmente hidrógeno y oxígeno) en forma de alquitranes, quedando un esqueleto carbonoso con porosidad incipiente (Navarrete 2005).

Bajas temperaturas de carbonización dan un mayor rendimiento en carbón vegetal de baja calidad, el cual es corrosivo por contener alquitranes ácidos. Una temperatura de 450-500°C ofrece un equilibrio óptimo entre friabilidad y el deseo de un elevado contenido de carbono fijo (FAO 1983).

El carbón vegetal tiene la capacidad de atraer en su superficie moléculas de gases (adsorción) y presenta valores máximos de superficie específica no mayores a los 2 m²/g de carbón. Las partículas de carbón tienen, en su estructura interna, una gran cantidad de cavidades o intersticios que alojan el material volátil (sustancias alquitranadas) que se forma durante la carbonización; estas áreas tienen baja capacidad de adsorción. Con la activación, el material volátil es eliminado por arrastre, dejando los intersticios libres, con el consiguiente aumento de la superficie específica que puede llegar a valores cercanos a los 2 000 m²/g. (Gonzales 2002).

3. CARBÓN ACTIVADO

El nombre de carbón activado se aplica a una serie de carbones porosos los cuales son sometidos a procesos de activación, mediante procesos de alta temperatura en atmósfera libre de oxígeno para evitar la combustión del carbón (Consultora de aguas 2009), para que exhiban un elevado grado de porosidad y una alta superficie interna. (Velázquez *et al.* 2010) El carbón activado es un adsorbente muy versátil, porque el tamaño y distribución de sus poros en la estructura carbonosa pueden ser controlados para satisfacer las necesidades de purificación en fase gaseosa y líquida (Velázquez *et al.* 2010).

El carbón activado es un material que se obtiene por carbonización de distintos tipos de madera o productos vegetales, que luego son molidos hasta el tamaño deseado y finalmente activados mediante procesos de alta temperatura en atmósfera libre de oxígeno para evitar la combustión del carbón (Consultora de aguas 2009).

La utilización de biomasa procedente de los residuos de forestaría y agricultura como combustible o como materia prima para la producción de carbón activado se encuentra en constante aumento, especialmente en países con gran riqueza forestal y agrícola que presentan una gran disponibilidad de producción de biomasa (Menéndez 2008). Casi todos los materiales que contienen un alto contenido de carbono fijo pueden ser potencialmente activados. Las materias primas más utilizadas son el carbón (antracita, bituminoso y lignito), cáscaras de coco, madera (tanto densidad baja como alta), la turba y los residuos derivados del petróleo (ver Figura 07) (Menéndez 2008).

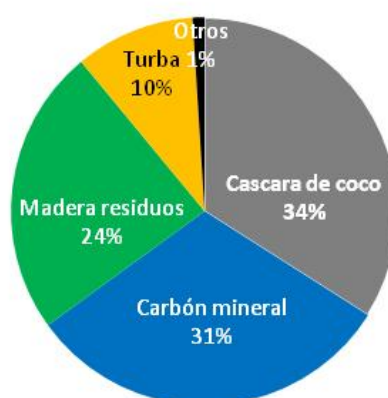


Figura 7: Distribución de las materias primas del carbón activado.

FUENTE: Menéndez (2008).

Son dos las características fundamentales en las que se basan las aplicaciones del carbón activado: elevada capacidad de eliminación de sustancias y baja selectividad de retención.

La elevada capacidad de eliminación de sustancias se debe a la alta superficie interna que posee, porosidad y distribución de tamaño de poros juegan un papel importante. Los macroporos se encuentran inicialmente en el material antes de su activación (Menéndez, 2008). Los microporos y mesoporos son formados en el proceso de activación y son los que le dan propiedades adsorptivas al carbón. En general, los microporos le confieren la elevada superficie y capacidad de retención. Los mesoporos y macroporos son necesarios para retener moléculas de gran tamaño, como pueden ser colorantes o coloides, además de favorecer el acceso y la rápida difusión de las moléculas a la superficie interna del sólido (Manual de carbón activo 2009).

En su estructura, los átomos se encuentran combinado en forma de placas gráficas, las cuales se encuentran separadas y desordenadas, por lo que, entre ellas, existen espacios libres a los que se denominan poros. Su estructura es micro porosa y esta característica lo hace absorber moléculas orgánicas tanto gaseosas como las disueltas en los líquidos (Manual de carbón activo 2009).

La capacidad de un carbón activado para retener una sustancia determinada no sólo está dada por su área superficial, sino por la proporción de poros cuyo tamaño sea el adecuado, es decir, de una a cinco veces el diámetro de la molécula de dicha sustancia. Los carbones activados son formas no gráficas de carbón con un área superficial interna elevada, debido a la porosidad intrínseca del precursor y/o desarrollado de esta esta durante el proceso (Varriano *et al.* 2013).

En un carbón activado, el área que corresponde a meso y macroporos muy pequeña con respecto a la de microporos. Desde un punto de vista práctico, el conocimiento del volumen de poros y la distribución de tamaño de los mismos, son los aspectos más importantes de la caracterización de un carbón activado, puesto que estos parámetros son los que van a permitir conocer directamente la cantidad de adsorbato que se puede retener según el diámetro de las moléculas en relación de los poros. (Martín 1990)

La superficie de los carbones, en particular los átomos de carbono, en los bordes de los enlaces de su estructura molecular, poseen impurezas (heteroátomos) que pueden encontrarse combinados en mayor o menor proporción al carbono, dando lugar a diferentes

grupos superficiales. Por otro lado, los átomos de carbono en la cara de los bordes de su estructura molecular, poseen orbitales que contienen electrones más o menos deslocalizados. La presencia o ausencia de los grupos superficiales, así como el mayor o menor grado de deslocalización de los electrones afecta a las interacciones del carbón con otros elementos o compuestos (ver Figura 08).

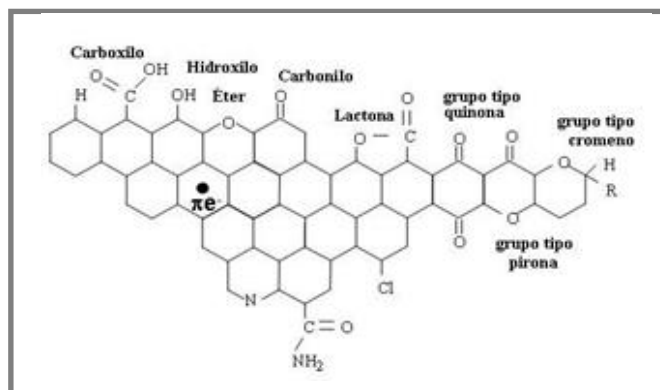


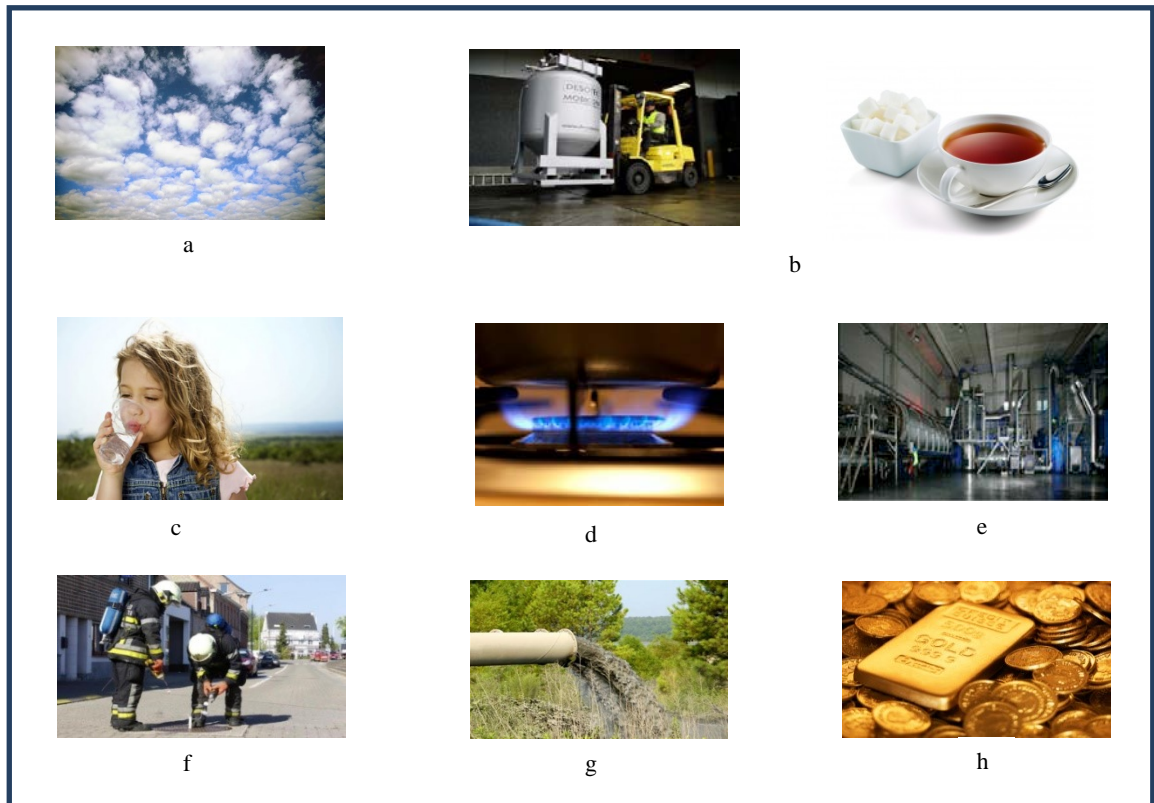
Figura 8: Esquema de los principales grupos funcionales que pueden encontrarse en un carbón activado.

FUENTE: Rozas (2008).

La elevada capacidad de adsorción que posee el carbón activado y la posibilidad que tiene de ser reutilizado, le permite un tratamiento eficaz y de bajo costo en múltiples aplicaciones. Las propiedades intrínsecas del carbón activado, son totalmente dependientes de la fuente de materia prima utilizada (Prías *et al.* 2011).

3.1. USOS DEL CARBÓN ACTIVADO

El carbón ha sido utilizado como adsorbente desde épocas remotas y se ha desarrollado hasta lo que hoy conocemos como carbón activado. Usado en áreas que van desde la medicina, el 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, en la purificación del aire, en la industria química, en la industria farmacéutica, en la purificación de gases, en la implementación de supercapacitores, en la decoloración de vinos, zumos y vinagres, en la eliminación de cloro libre en agua potable, en la eliminación de ozono en agua potable, en la eliminación de geosminas, antracinas, simazinas, y en la eliminación de dioxinas, entre otros (ver Figura 09) (Prías *et al.* 2011).



A) Purificación del aire, B) Sistemas de purificación para la industria alimentaria, C) Depuración de agua para consumo humano, D) Purificación de gases, E) Purificación en procesos industriales, F) Para protección personal y colectiva (filtros), G) Depuración de agua destinada al riego y H) Filtrado en recuperación de minerales

Figura 9: Usos del carbón activado

FUENTE: Desotec (2016).

En la actualidad, el carbón activado es un producto muy cotizado en el mercado mundial, pese a que su producción es controlada por países altamente desarrollados como Holanda, Reino Unido, Japón, Alemania y los Estados Unidos. Se define al carbón activado como un material capaz de adsorber, y en su preparación deja al carbón poroso con una vasta red de pasajes interconectados capilarmente proporcionando una área superficialmente muy grande (Schanz y Parry, 1962), en otras bibliografías sostienen que es un producto que se prepara por distintos métodos, los cuales le imparten un aumento de porosidad y en consecuencia mayor poder de adsorción, originada por su superficie de contacto y de la interacción entre adsorbente y adsorbato (NTP 1982).

El hecho que dos carbones activados pueden contener el mismo porcentaje de carbón activo no asegura que estos sean efectivos para el mismo uso; por tanto no se encuentran carbones de uso universal. Con ello se explica la variabilidad y apertura para su producción a nivel mundial y nacional (Mantell 1951).

4. CARBONIZACIÓN O PIRÓLISIS.

El proceso de calentamiento de materiales orgánicos en ausencia de aire se denomina pirólisis o carbonización. Por lo general se utiliza el término pirólisis cuando dicho proceso se enfoca a la obtención de los gases y aceites que se producen y carbonización cuando, como en el caso del carbón vegetal, el proceso se dirige hacia la obtención del producto sólido resultante, carbonizado (Menéndez 2008).

Durante la pirólisis se forma la estructura básica del carbonizado, que se consolida a temperaturas mayores entre 500 y 850°C (Gómez *et al.* 2010). En esta etapa se produce una masa de carbono fijo con una estructura porosa rudimentaria, donde muchos poros, extremadamente finos y cerrados son formados (ver Figura 10) (Morais *et al.* 2003).

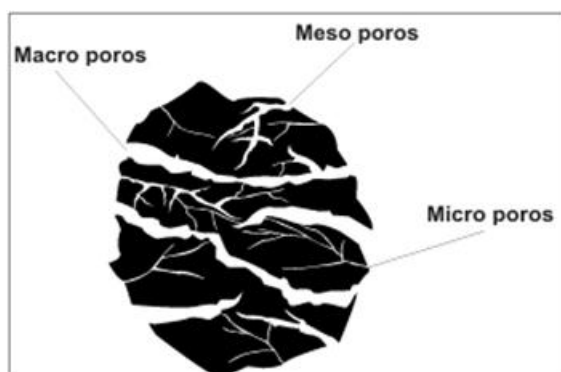


Figura 10: Distribución porosa al interior del carbón activado.

FUENTE: Carbotecnia (2016)

Simultáneamente durante el proceso de carbonización se presenta la contracción volumétrica de la partícula. Al medir la capacidad de adsorción del carbonizado se encuentran valores muy bajos, lo que se debe a que éste tiene una estructura porosa poco desarrollada ocupada parcialmente por alquitrans condensados durante la carbonización. Las condiciones del proceso de carbonización de la biomasa son fundamentales porque determinan la distribución y características de los productos sólidos (incluyendo su estructura porosa), líquidos y gaseosos generados (Gómez *et al.* 2010).

Una forma de inferir la porosidad del carbón activado obtenido es mediante el cálculo del “*burn-off*” o pérdida por combustión o grado de activación, el cual se usa como una medida del grado de activación e indica el porcentaje en peso de pérdida de material durante la activación. La clasificación del tipo de carbón se halla de la diferencia de 100 menos el rendimiento del carbón activado respecto del carbón vegetal, obteniéndose la merma de carbón vegetal durante el proceso de activación. De manera que para pérdidas por combustión menores a 50 por ciento se obtienen carbones activados microporosos, pérdidas mayores a 75 por ciento, carbones macroporosos; y pérdidas entre 50 y 75 por ciento, el producto obtenido es una mezcla de estructura micro y macroporosa (Dubini citado por Azañero 1988).

5. PROCESO DE ACTIVACIÓN.

Entre los procesos de transformación se encuentra la activación del carbón vegetal (activación física y/o activación química) para producir carbón activado, el cual tiene un desempeño considerablemente más eficiente en usos tales como: filtro de gases, filtros de aguas, decolorantes de vinos, desodorizantes y otros usos en los que se valore la propiedad de adsorción (Bambú en Chile 2003).

Para lograr la carbonización de la materia prima, se requiere de la descomposición físico-química bajo la acción del calor y en ausencia de un medio oxidante.

Este proceso es un tipo de pirólisis, se presenta a temperaturas en el rango desde 400°C hasta 600°C y tiempos que varían desde horas hasta días, carbonización que crea productos en estado de gases, líquidos y carbón, cuyas cantidades relativas dependen de las propiedades del precursor a tratar y de los parámetros de operación del equipo de calentamiento. Se requiere de una fuente de calor constante, en un reactor, el cual puede ser continuo o discontinuo, debe producirse una atmósfera libre de oxígeno, para evitar que la biomasa se consuma por efectos de la oxidación (ver Figura 11).

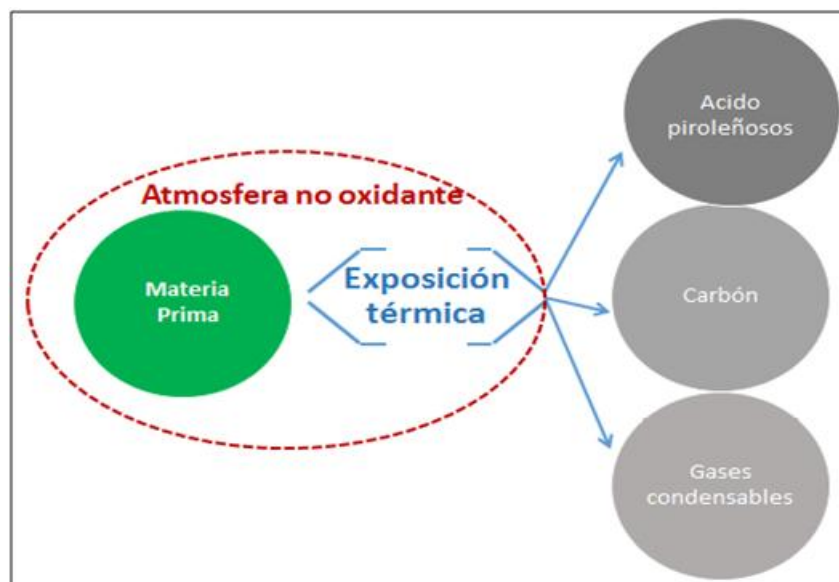


Figura 11: Esquema básico del proceso de la carbonización.

FUENTE: Elaboración propia

De acuerdo a la naturaleza de la materia prima, la obtención del carbón activado puede ser obtenido fundamentalmente de dos formas: mediante activación física y por activación química (ver Tabla 08) (Luttermal 1940):

- Por activación química: que consiste en la carbonización del material previamente mezclado con un agente activante.
- Por activación física: a través de tratamiento de material carbonizado con gases oxidantes como dióxido de carbono y vapor de agua.

Tabla 8: Métodos de activación según la materia prima

<i>Materia prima</i>	<i>Método de activación física</i>	<i>Método de activación química</i>
<i>Carbón de leña</i>	X	X
<i>Aserrín de madera</i>		X
<i>Viruta, residuo de la extracción de resina</i>		X
<i>Viruta, residuo de la extracción de las curtiembre</i>		X
<i>Cáscara de coco</i>	X	X
<i>Semilla de Frutas</i>		X
<i>Cáscara de arroz</i>		X
<i>Bagazo</i>		X
<i>Turba</i>		X
<i>Huesos</i>	X	
<i>Cáscara de café</i>		X

FUENTE: LUTTERAL (1940).

6. CLASIFICACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO

Los carbones activados se clasifican de acuerdo a su granulometría en dos tipos (ASTM 1981 y NTP 1982):

- **Carbones activados en polvo:** de partículas de menor tamaño a la malla N° 80 (ver Tabla 09). Se sostiene que este tipo, es usado para decoloración o purificación de líquidos como lo indica Schanz *et al.* 1962; así como para la remoción de materias colorantes de soluciones y con fines médicos (carbón pulverizado) mencionado por Smisek *et al.* 1970.
- **Carbones activados granulares:** de partículas de mayor tamaño a la malla N° 80 ver Tabla 09). Se usa para la absorción de gases, este puede ser aparte de granular paletizado y prensado; existen diferentes estudios realizados en el país y en el extranjero acerca de carbones activados por el Método Químico con diferentes materias primas vegetales mencionados por Smisk *et al.* 1970 y Schanz *et al.* 1962.

Tabla 9: Serie de mallas ASTM (utilizadas para tamizado)

N° de malla ASTM	Abertura (mm)	Abertura (μm)
20	0,85	850
40	0,425	425
60	0,25	250
80	0,18	180
100	0,15	150

FUENTE: ASTM (2007).

Analizando los carbones activados obtenidos a partir del tallo de Guadua, en un estudio se obtiene que el proceso se realiza a través de activación química, con cloruro de zinc ($ZnCl_2$), a una concentración de 5 por ciento. Demostrando un nivel importante de absorción (prueba de azul de metileno e índice de yodo con presencia de valores altos de cenizas y bajos en carbono fijo) (González 2002).

El carbón activado de la especie *Bambusa tulda* fue encontrado como el mejor en términos de área superficial y capacidad de adsorción (ver Tabla 10) (Baksi *et al.* 2005).

Tabla 10: Propiedades del carbón activados

N°	Parámetros	Carbón activado de cáscara de Coco	Bambú:	Bambú:	Bambú: <i>Pseudoxytenanthera stocksii</i>
			<i>Melocanna baccifera</i>	<i>Bambusa tulda</i>	
1	Área superficial (m ² /gm.)	1 150	1 220	1 350	1 280
2	Volumen de poro (cc/gm.)	0,73	0,4995	0,9614	0,5057
3	Medida de diámetro de poro (A°)	-	16,53	16,63	16,19
4	Densidad de volumen (gm/cc)	0,46-0,49	0,213	0,237	0,28
5	Material volátil %	-	21,3	21,3	21,3
6	Contenido de ceniza	3,00	3,38	3,38	3,38
7	N° de yodo (mg/gm.)	1 100	950 - 1 050	950 - 1 100	950 - 1 100

FUENTE: *Baksi et al. (2005).*

Se obtuvo carbón activado a partir de la caña *Arundo donax*, un precursor lignocelulósico ampliamente disponible, perteneciente al grupo de plantaciones “energéticas”, mediante el proceso de activación química, empleando una solución de ácido fosfórico como agente activante y condiciones moderadas de operación. Se encontró que el ácido fosfórico ejercería un efecto atenuante sobre la degradación de la caña impregnada a altas temperaturas (> 300°C), por lo que a pesar de la activación, la morfología del carbón activado obtenido resultó similar a la del precursor virgen. Asimismo, el agente activante promovería en el precursor transformaciones químicas y texturales que serían las responsables del desarrollo de porosidad en el carbón activado resultante. Este presentó un área específica de 1 116 m²/g, un volumen total de poros de 0,9 cm³/g y un bajo contenido de fósforo residual (0,3 por ciento). Los resultados alcanzados sugieren que es posible el aprovechamiento de la caña *Arundo donax* para su conversión termoquímica en carbón activado de buena calidad, es decir, en un producto de amplia demanda y utilidad, particularmente en emprendimientos relacionados con la protección del medio ambiente (*Basso et al. 2004*).

Los estudios realizados indican que la activación del bagazo de caña de azúcar empleando ácido fosfórico (H₃PO₄) a una concentración de 41 por ciento P/P (peso a peso) conduce a carbones activados con una satisfactoria capacidad de adsorción. El valor máximo de área específica desarrollada es de 1 132 m²/g para una temperatura de tratamiento térmico de

500°C y tiempo de 1 h. El proceso aplicado permite obtener, a partir de este residuo, carbones activados con distintas características de porosidad, variando convenientemente las condiciones de operación en función de las aplicaciones específicas requeridas (Blanco *et al.* 1999).

En la obtención de carbón activado de aserrín de tornillo (*Cedrelinga cateniformis* Ducke), Machinga (*Brosimum alicastrum*) y caoba (*Swietenia macrophylla* King), para ello se utilizó Cloruro de zinc al 1 por ciento con un índice de impregnación de 1 (materia prima) : 0,8 (agente activante) como agente activante, el carbón que mejores resultados obtuvo en la capacidad de absorción fue con el número de tamiz 60 ASTM, con un contenido de humedad de la materia prima de 12 por ciento y tiempo de impregnación de 24 horas y el de mejor rendimiento de la especie Machinga, seguido por la caoba y el tornillo (Teruya 2003).

En la obtención de carbón activado a partir de aserrín de tornillo (*Cedrelinga cateniformis* Ducke) se empleó el cloruro de zinc como factor activante. Donde el carbón activado con un índice de impregnación de 1(materia prima): 0,8 (agente activante) a 700°C de temperatura de carbonización-activación durante 90 minutos presento mayor capacidad de adsorción. Para la medición de la adsorción (Layseca 2001) empleo el método del azul de metileno utilizando un espectrofotómetro para medir dicha adsorción (Layseca 2001).

6.1. MÉTODO DE OBTENCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO

Durante la pirólisis o carbonización de las sustancias orgánicas se elimina casi todo el hidrogeno y el oxígeno (Smisek *et al.* 1970), el carbono restante se cristaliza en formas irregulares, la descomposición del alquitrán rellena los espacios porosos dando como resultado una capacidad baja del absorbente. La finalidad de la activación es limpiar los poros de los compuestos derivados del alquitrán.

- Activación por el método físico

La activación física con gases se parte en general del material carbonizado - material primario, que luego de ser molido es clasificado con el propósito de tener tamaños uniformes y luego es activado (Smisek *et al.* 1970). Los gases más utilizados son el vapor de agua, el dióxido de carbono y el oxígeno; así como también los gases de cloro, azufre, amonio y otras sustancias que tienen también efectos de activación pero son poco usados para este propósito.

Durante la activación física tiene lugar una pérdida de sustancia que puede ser considerable, y se produce un incremento de la porosidad y un aumento de la superficie interior (volumen de poros). Por ello, la activación tiene lugar bajo condiciones oxidantes, selectivas o controladas. En términos generales gases de activación habituales son: el oxígeno, en especial en forma de aire, vapor de agua y/o dióxido de carbono (Varriano *et al.* 2013).

Tal como ha sido reportado por Gonzales (2002) el carbón activado del bambú, presenta propiedades superiores al de otros precursores vegetales; por lo tanto es un campo abierto de investigación. Al respecto, se conoce que la guadua es una buena materia prima como precursor para producir carbón activado, debido a su bajo costo de producción y alta tasa de reposición; teniendo en cuenta que gran parte de esta importante materia prima se pierde en los rodales o queda como desecho en el sector de la construcción (Prías *et al.* 2011).

- **Activación por el método químico**

El proceso de activación química es aplicado directamente a la materia prima, en cambio para la activación física tiene que haber una carbonización previa a la activación. Los procesos químicos de activación son obtenidos por impregnación empleándose. Sustancias deshidratantes como el cloruro de zinc, **ácido fosfórico**, ácido sulfúrico, ácido bórico, ácido nítrico, sulfuro de potasio, sulfatos de magnesio y sodio, tiocionato de potasio, además de otras sustancias; mezclan estas con la materia prima, teniendo en cuenta un tiempo de reacción, esta es consecutivamente carbonizada, produciéndose gases oxidantes y degradándose las moléculas orgánicas por deshidratación restringiéndose así la formación de brea (Meggs 1968).

Los agentes oxidantes reducen al máximo la formación de brea y tanto el cloruro de zinc como el ácido fosfórico actúan como un fuerte deshidratante y permiten la combinación del hidrogeno con el oxígeno de la célula para formar agua, Los vestigios de agua son eliminados, con lo cual solo pueden formarse cantidades muy pequeñas de alquitrán dejando finalmente que la mayor parte del alquitrán se transforme en compuestos de carbono; en esa forma los poros del carbón quedan libres. Este método de obtención por activación química da óptimos resultados (Lutteral 1940 y Guerrero 1987).

Los carbones activados químicamente tiene un área superficial considerablemente mayor a la del carbón activado por vapor (Fornwalt *et al.* 1963). Meggs (1968), menciona que el proceso de activación química es aplicada directamente a la materia prima en cambio para la

activación física tiene que haber una carbonización previa a la carbonización (ver Tablas 11, 12 y 13).

Tabla 11: Ventajas y desventajas de los métodos de activación

Ventaja	Desventajas
Bajos costos de operación de planta, debido a que existen pocas operaciones críticas de control.	Durante todo el proceso de activación hay que mantener temperaturas de 900°C, lo que lleva a un costo significativo de la maquinaria; altos costos de máquina.

FUENTE: Morelli (2000).

Tabla 12: Activación física

Agentes activantes	
Aire	No muestra costos relevantes sin embargo se produce una reacción exotérmica, muy difícil de controlar
CO₂	Por ser gas inerte, evita los problemas de temperatura que ocasiona el aire como agente activante. El problema radica en el costo del gas.
Vapor de agua	El vapor de agua opera a temperaturas cercanas a los 1 000°C, la reacción producida es endotérmica, lo que nos permite controlar el proceso con mayor facilidad. Así mismo, en comparación con el costo de CO ₂ , el vapor de agua resulta más rentable.

FUENTE: Morelli (2000).

Tabla 13: Activación química

Ventajas	Desventajas
Se puede recuperar gran parte del agente activante, llevando esto a una disminución en los costos por insumos; costo de maquinaria son menores.	Costos de control de operaciones críticas en las etapas de activación y carbonización.

FUENTE: Morelli (2000).

7. AGENTE ACTIVANTE. ÁCIDO FOSFÓRICO (H₃PO₄) Y CLORURO DE ZINC (ZnCl₂).

La investigación de Basso *et al.* (2004) encontró que el ácido fosfórico a una concentración de 50 por ciento P/P ejercería un efecto atenuante sobre la degradación de la caña (Arundo donax), planta perenne perteneciente a la familia de las Gramíneas, impregnada a altas temperaturas (> 300°C), por lo que a pesar de la activación, la morfología del carbón activado obtenido resultó similar a la del precursor virgen. Asimismo, el agente activante promovería en el precursor transformaciones químicas y texturales que serían las responsables del desarrollo de porosidad en el carbón activado resultante. Este presentó un área específica de 1 116 m²/g, un volumen total de poros de 0,9 cm³/g y un bajo contenido de fósforo residual (0,3 por ciento).

Jagtoyen y Derbyshire citados por Basso *et al.* (2004) indican que el proceso de activación química utilizando ácido fosfórico (H₃PO₄) como agente activante presenta ciertas ventajas con respecto a aquellos históricamente aplicados, es decir, activación física o con cloruro de zinc (ZnCl₂). Este involucra una única etapa de tratamiento térmico, requiere temperaturas moderadas, permite la recuperación del ácido y alcanzar mayores rendimientos.

Ruiz y Rolz; Girgis y col; Jiaan y col, citados por Blanco *et al.* (2000), indican que han enfocado su preparación aplicando el proceso de activación "física" o la activación química utilizando ZnCl₂ o ácidos inorgánicos, como agentes activantes, durante tiempos prolongados de tratamiento térmico, generalmente, entre 3 y 10 h; a pesar del empleo de estas condiciones severas, en algunos de ellos no se han alcanzado altas capacidades de adsorción. En particular, el proceso de activación química de residuos biomásicos empleando ácido fosfórico como agente activante para la obtención de carbones activados tiene varias ventajas con respecto al de activación "física" ya que involucra una única etapa de tratamiento térmico, requiere temperaturas considerablemente menores, permite una eficiente recuperación del ácido mediante extracción multi-etapas y se alcanzan mayores rendimientos y capacidades de adsorción, disminuyendo los costos del proceso.

En el Perú la exportación de carbón activado presenta fluctuaciones en el periodo 2008 - 2012 como se muestra en la Tabla 14 y los principales países al que exportamos son: Ecuador y Bolivia entre otros.

Tabla 14: Exportación de carbón activado

<i>Año</i>	<i>Peso Neto (Kg.)</i>	<i>FOB \$</i>
2008	22 360	36 654
2009	3 121	8 541
2010	410	1 425
2011	63 835	176 359
2012	4 309	13 662
2008 – 2012	94 035	236 641

FUENTE: SUNAT (2014). Elaboración propia.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

1. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA MUESTRAL

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA FLORIDA- CAJAMARCA

La zona de colección de la muestra corresponde a la parte alta de la cuenca del río Zaña, en el distrito de La Florida, provincia de San Miguel, departamento de Cajamarca. La zona de colección posee un clima cálido (1 100 m.s.n.m.), semihúmedo y húmedo, el valle de la cuenca pertenece a la franja árida de la costa con cerros y planicies sin vegetación. La parte alta puede considerarse como zona de clima húmedo y semihúmedo por las grandes precipitaciones.

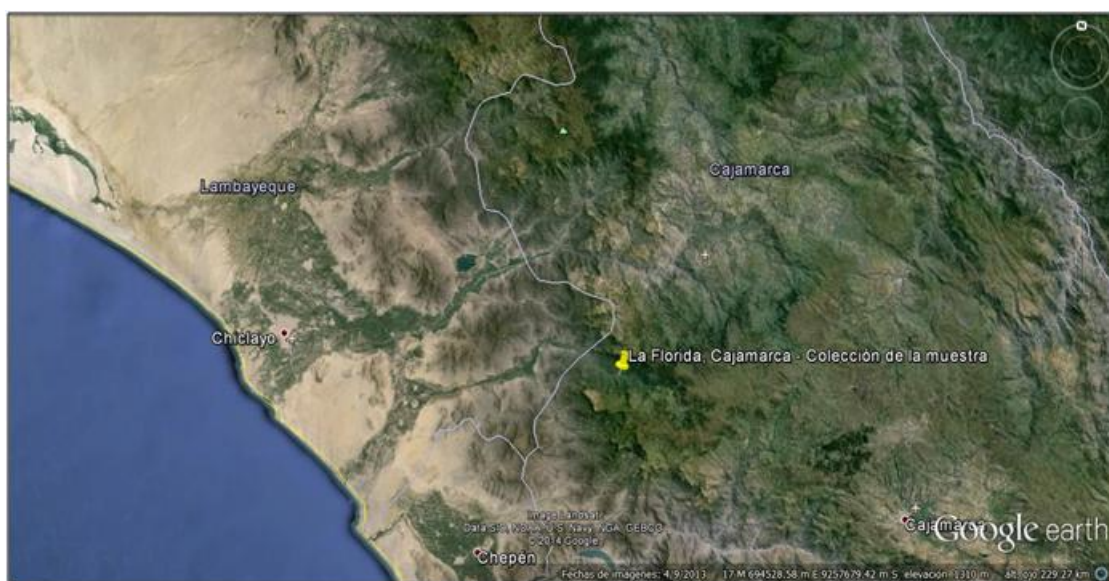


Figura 12: Lugar de colección de la muestra.

FUENTE: Google Earth (2016).

1.2. SUELOS Y ECOLOGÍA DEL PUNTO DE RECOLECCIÓN DE MUESTRA

La Florida se encuentra ubicada en un terreno donde predominan suelos leptosol lítico. La topografía es accidentada, presentando fuertes pendientes se encuentra dentro de la franja denominada Bosque seco de montaña (suelos de profundidad variable, de naturaleza calcárea, dominados por procesos de calcificación y de bajo contenido de materia orgánica). Mayormente las especies son caducifolias, sobresaliendo por su abundancia y dominancia el

pasallo, ceibo, palo santo, hualtaco, guayacán, abundante presencia de epífitas conocidas como salvajina (*Tillandsia usneoides*), que se cuelgan de las copas y de las ramas de los árboles (INRENA 1996).

Todas estas características han hecho que los productores locales acojan la especie como plantación a gran escala. Además de las potencialidades relacionadas con su uso, comercialización local. Para fines del presente estudio, estas variables hicieron que el punto de muestra seleccionado sea idóneo.

2. SELECCIÓN DE LA MATRIZ.

La materia prima a utilizar en el presente estudio fue colectada en el departamento de Cajamarca, provincia de San Miguel en la localidad de La Florida. La especie a usar será: bambú "*Guadua angustifolia* Kunth".

A nivel local, el bambú es un producto históricamente usado; actualmente su uso se direcciona a la industria de la construcción de viviendas, albergues turísticos, mueblería fina, cercos perimétricos, defensas ribereñas, arborización urbana, artesanía, tutores en cultivos agroindustriales, forraje, para el consumo humano; en general la diversidad de uso local hace que la especie se mantenga con una producción estable.

Se espera que a corto y mediano plazo, a nivel mundial, el uso del bambú como fuente de energía alternativa sea de carácter general (animado por el control de usos de combustibles fósiles y de y la promoción de programas en Pro de uso de energías renovables) y más aún por tratarse de un recurso renovable y de rápido crecimiento.

Esto hace que el bambú a nivel nacional tenga proyección a mantener producción; más aun teniendo en consideración que este producto muestra una gran capacidad adaptativa a los diferentes ecosistemas (con nivel probado de resistencia a las inclemencias del lugar como lluvias prolongadas, periodos largos de sequía, suelos ácidos o alcalinos, etc).

Para la obtención de carbón activado; se considera como estrategia del presente estudio la optimización en el uso integral del bambú como se muestra en la Figura 13; acentuándonos en los residuos generados del aprovechamiento del bambú, coloquialmente llamado "basura de bambú".

- Tallos o también llamados culmos defectuosos.

- Desechos de las ramas.
- Partes terminales superiores.

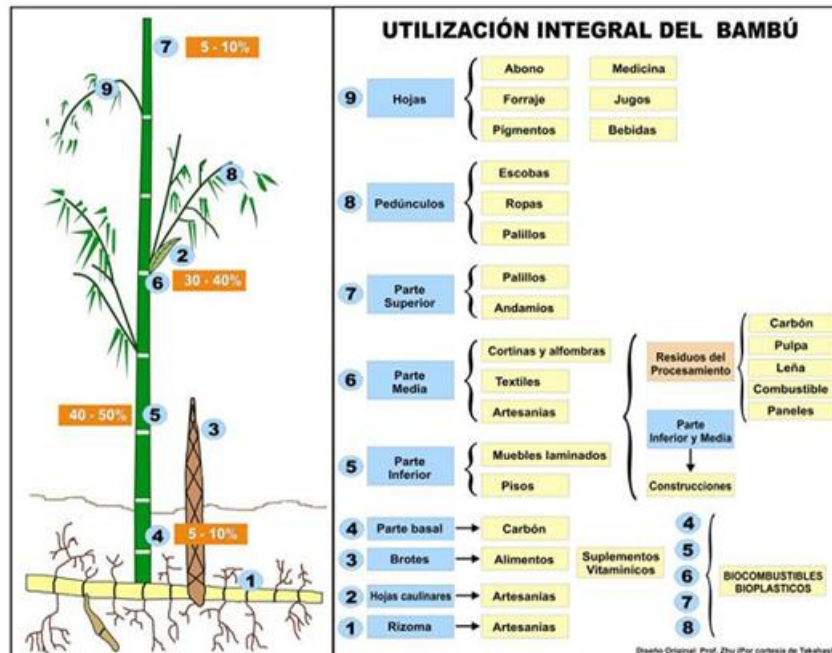


Figura 13: Utilización integral del bambú.

FUENTE: Zhu Zhaohua (2009).

Solo aproximadamente el 30 por ciento de la longitud del culmo (la porción superior por el diámetro reducido y el grosor de su pared además de la parte inferior por su estructura semirrígida y también con muchos nudos) no pueden convertirse en los productos de valor agregado dichos en el párrafo anterior (Baksi *et al.* 2005).

Ciertamente especies de bambú con diámetros pequeños tal como la especie *Melocanna baccifera* no son apropiadas para su conversión. Los desperdicios de bambú son así mejor convertidos en carbón activado para un valor adicional alto (Baksi *et al.* 2005).

3. LUGAR DE ANÁLISIS.

El estudio fue realizado en: el laboratorio de análisis químicos del Área de Transformación Química del Departamento de Industrias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

4. MATERIALES USADOS.

El listado de materiales y reactivos utilizados en el presente estudio es presentado a continuación:

4.1. MATERIALES DE LABORATORIO USADOS.

- Capsulas de porcelana con tapa
- Crisoles
- Cronómetro
- Espátulas
- Materiales de vidrio: baguetas, buretas, embudos, pipetas, probetas, vaso de precipitado, barra de agitación y fiolas.
- Matraces erlenmeyer.
- Crisoles con filtro.
- Papel filtro n° 41
- Termómetro
- Mortero

4.2. EQUIPOS USADOS.

- Molinos de discos
- Tamices ASTM con número (abertura de la malla): 40 (0,425mm.), 60 (0,250mm.) y 100 (0,15 mm.).
- Balanza analítica plus, marca “Ohaus”, de 220v. , capacidad de 200g. , con una precisión de 0,1 mg

- Balanza portátil Standard, marca “Ohaus” LS 200, 12v. , capacidad de 200g. , con una precisión de 0,1 g
- Campana de vidrio; con desecador de silicagel
- Juego de mallas.
- Mufla marca “thermolyne 48 000”, modelo N° f1630, de 220v. Temperatura máxima de 1 200 C°
- pH-metro, marca “WTW Ph 325
- Estufa marca “Heraeus”, temperatura máxima de 300°C
- Espectrofotómetro SQ 118, marca Merck, alemana
- Agitador Magnético

4.3. REACTIVOS QUÍMICOS USADOS

- Agua destilada
- Ácido Fosfórico (25-50 por ciento P/P)
- Azul de metileno

5. METODOLOGÍA.

Se siguió el diagrama de flujo, mostrado en la Figura 14. Las muestras siguieron el proceso de activación química y el carbón activado obtenido fue evaluado y finalmente caracterizado para seleccionar el o los carbones con mejores características.



Figura 14: Diagrama de la metodología aplicada para la obtención de carbón activado y sus evaluaciones

Las etapas seguidas en el presente estudio son descritas en los siguientes puntos:

Acondicionamiento de la materia prima

Los culmos o tallos defectuosos, desechos de las ramas y partes terminales superiores llegan enteros y con alto contenido de humedad, posteriormente el material se coloca dentro del laboratorio en un ambiente donde circula el aire para secarlas al ambiente, buscando de esta manera un contenido de humedad constante como se muestra en las Figuras 15 y 16 respectivamente.



Figura 15: Acondicionamiento de materia prima en el laboratorio.



Figura 16: Corte y acondicionamiento de materia prima.

Posteriormente la materia prima fue trozada para modelarlo al tamaño de “chips de madera” y lograr someterlas en un molino de discos, logrando obtener partículas asimétricas de bambú.

Este material asimétrico se llevó a tamizarlo en mallas 40/60 ASTM dos niveles de depuración estandarizada (tamaño de partículas entre 0,425 y 0,250 mm). Este proceso permitió obtener dos tipos de muestra:

- 1) Muestra para carbón activado granular.
- 2) Muestra para carbón activado en polvo.

Impregnación con solución de ácido fosfórico

Los dos tipos de muestra fueron sometidos diferenciadamente a un proceso de impregnación química en capsulas de porcelana como se muestra en las Figuras 17 y 18 respectivamente.

La cantidad muestra empleada para cada ensayo fue de 30 g. y estando a un contenido de humedad de 14 por ciento y con tiempo de impregnación de 24 horas.

El agente químico utilizado para la activación en ambas muestras fue el ácido fosfórico (H_3PO_4) a una concentración de 25 y 50 por ciento P/P con un índice de impregnación de 1(muestra): 1,5 (agente activante).

La aplicación de esta metodología fue tomada para la presente investigación en base a las referencias desarrolladas por Basso *et al.* (2004).



Figura 17: Impregnación del material precursor.



Figura 18: Impregnación de la materia prima y reposo de 24 horas.

5.1. CARBONIZACIÓN – ACTIVACIÓN.

Con el objeto de obtener distintos tipos de carbones activados y hacer un análisis de su cada rendimiento y calidad del producto, se efectuó 16 ensayos (más 16 repeticiones) diferenciados por variables independientes de:

- Temperatura.
- Tiempo
- Concentración de ácido fosfórico

De esta manera, se somete las 08 muestras de materia prima para carbón activado granular y 08 muestras de materia prima para carbón activado en polvo cada una en capsulas de porcelana con tapa a temperaturas diferenciadas de 500 y 700°C respectivamente, en una Mufla eléctrica.

Además se aplicaron múltiples ensayos intercalados de 60 y 90 minutos con concentraciones de ácido fosfórico a 25 y 50 por ciento P/P, según como se muestran los ensayos realizados en las Figuras 19 y 20 respectivamente.



Figura 19: Carbonización - Activación del carbón activado en polvo.



Figura 20: Carbonización - Activación del carbón activado granular.

5.2. LAVADO Y FILTRADO.

Con la ayuda de un embudo de vidrio y un papel filtro N° 41 se procedió a lavar las muestras (anteriormente carbonizadas y activadas) con agua destilada a 95°C con la finalidad de hacer ajustes en el pH y eliminar cualquier exceso de H_3PO_4 como se muestran en las Figuras 21 y 22



Figura 21: Calentar agua destilada a 95°C.



Figura 22: Echar agua destilada caliente al carbón activado para lavar.

5.3. SECADO.

Finalmente las 16 muestras con distintos tratamientos se someten a secado en una estufa a una temperatura de $105^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$ por un lapso de 24 horas.

5.4. MOLIENDA, TAMIZADO Y ACONDICIONAMIENTO.

Con la finalidad de reducir el tamaño de las partículas de las muestras, aumentar el área superficial y obtener carbón activado en polvo, la mitad de las muestras fueron sometidas a un proceso de molienda con la ayuda de un mortero con la acción más suave posible, de acuerdo con Hassler (1973), para evitar dañar la filtrabilidad del material, luego se tamizó por la malla 100 ASTM (tamaño de partículas menores a 0,150 mm), la otra mitad se analizó como carbón activado granular dado que en el proceso de acondicionamiento de la materia prima se tamizó con las mallas 40/60 ASTM (tamaño de partículas entre 0,425 mm y 0,250 mm).

6. EVALUACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO ELABORADO.

Se realizaron las siguientes pruebas siguiendo las normas técnicas estipuladas para cada uno de los parámetros evaluados para la determinación de las características del carbón activado:

1 Rendimiento (R) %	Con la fórmula según Teruya (2004): $\frac{\text{Peso de carbón activado} \times 100}{\text{Peso seco del aserrín}}$
2 Grado de activación (porosidad) %	Fórmula según Dubini citado por Azañero (1988) : $GP = (100 - \%R)$
3 Densidad aparente (g/cm ³)	Con la fórmula según Castillo citado por Teruya (2004): $\text{Densidad} = (\text{Peso de carbón activado} / \text{volumen})$
4 Contenido de humedad %	Norma ASTM (2007)
5 Material volátil %	Norma ASTM (2007)
6 Contenido de cenizas %	Norma ASTM (2007)
7 Carbono fijo %	Con la fórmula: $CF = 100 - (\text{contenido de cenizas \%} + \text{material volátil})$
8 pH	NTP 027.025-1982 citado por Teruya (2004)
9 Absorción del azul de metileno %	Decoloración del azul de metileno por el carbón activado (medido con el espectrofotómetro con una longitud de onda 446 nm.) por Layseca (2001) y Teruya (2004).

En la última prueba se cuantifica el porcentaje de adsorción del carbón activado, a partir de la decoloración que ejerce el carbón en la solución de azul de metileno. Se realizó mediante la metodología seguida por Layseca (2001) y NMX (1977).

7. DISEÑO ESTADÍSTICO.

En el análisis para el trabajo se utilizó el programa MINITAB 15 con un diseño experimental $(2B \times 2 \times 2 \times 2) = 2B \times 2^3$, es decir que estará comprendido de 3 factores y 2 niveles, siendo estos 3 factores asociados con un análisis de experimento factorial con bloques completos al azar, y la formula es la siguiente:

$$Y_{ijkl} = m + t_i + b_j + g_k + r_l + (t b)_{ij} + (t g)_{ik} + (b g)_{jk} + (t b g)_{ijk} + e_{ijkl}$$

$$i = 1,2 \quad j = 1,2 \quad k = 1,2 \quad l = 1,2$$

Donde:

Y_{ijkl} : Es el "factor" de carbón activado en la i-ésima temperatura, en el j-ésimo tiempo, en la k-ésima concentración y en el l-ésimo de carbón.

m : Es el efecto de la media general del "factor" de carbón activado.

t_i : Es el efecto de la i-ésima temperatura.

b_j : Es el efecto del j-ésimo tiempo.

g_k : Es el efecto del k-ésima concentración.

r_l : Es el efecto del k-ésimo tipo de carbón.

$(t b)_{ij}$: Es el efecto de la interacción bajo la i-ésima temperatura, el j-ésimo tiempo.

$(t g)_{ik}$: Es el efecto de la interacción bajo la i-ésima temperatura, la k-ésima concentración.

$(b g)_{jk}$: Es el efecto de la interacción bajo el j-ésimo tiempo, la k-ésima concentración.

$(t b g)_{ijk}$: Es el efecto de la i-ésima temperatura, el j-ésimo tiempo, en la k-ésima concentración y en el l-ésimo tipo de carbón .

En este estudio se utilizó este modelo que comprende 3 factores, por lo cual únicamente estamos interesados en los dos niveles del factor temperatura, en los dos niveles del factor tiempo, en los dos niveles del factor concentración como se muestra en la Tabla 15. Es un modelo de Análisis de Variancia de efectos fijos, mostrando los efectos de interacción de los factores en estudio; probando las siguientes hipótesis:

H_p: El efecto de los factores A, B o C son nulos.

H_o: El efecto de los factores A, B o C no son nulos.

H_p: El efecto de las interacciones AB, BC o AC son nulos.

H_o: El efecto de las interacciones AB, BC o AC no son nulos.

H_p: El efecto de la interacción ABC es nulo.

H_o: El efecto de la interacción ABC no es nulo.

Tabla 15: Diseño experimental de los tratamientos empleados para la elaboración de carbón activado, por el método químico.

TIPO DE CARBON	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO (minutos)	CONCENTRACIÓN de Ácido Fosfórico % P/P	ENSAYO + REPETICION
POLVO	500	60	25	M1, R1
			50	M2, R2
		90	25	M3, R3
			50	M4, R4
	700	60	25	M5, R5
			50	M6, R6
		90	25	M7, R7
			50	M8, R8
GRANULAR	500	60	25	M9, R9
			50	M10, R10
		90	25	M11, R11
			50	M12, R12
	700	60	25	M13, R13
			50	M14, R14
		90	25	M15, R15
			50	M16, R16

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. CARACTERÍSTICAS DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO

1.1. CARACTERÍSTICAS DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO

Los resultados promedio de las evaluaciones realizadas al carbón activado obtenido se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16: Resultado de las variables de evaluación de los carbones activados

<i>Tipo de Carbón</i>	<i>Temperatura °C</i>	<i>Tiempo (minutos)</i>	<i>Concentración de Ácido Fosfórico % P/P</i>	<i>Rendimiento (%)</i>	<i>Densidad aparente (g/cm³) (promedio)</i>	<i>Contenido de humedad % (promedio)</i>	<i>Material volátil % (promedio)</i>	<i>Contenido de cenizas % (promedio)</i>	<i>Carbono fijo % (promedio)</i>	<i>Absorción del azul de metileno (promedio)</i>	<i>Lectura de pH a t° ambiente</i>
POLVO	500	60	25	53,68	0,386	14,56	18,40	29,66	51,94	18,75	2,29
POLVO	500	60	50	55,40	0,492	16,19	16,16	31,71	52,14	46,47	2,40
POLVO	500	90	25	52,31	0,402	17,37	19,10	29,03	51,87	33,51	2,50
POLVO	500	90	50	55,49	0,427	13,64	13,67	31,99	54,35	57,35	2,58
POLVO	700	60	25	53,81	0,387	15,85	15,39	35,47	49,14	29,38	2,33
POLVO	700	60	50	53,88	0,489	23,10	9,64	39,24	51,12	65,59	2,57
POLVO	700	90	25	51,49	0,403	15,33	15,40	38,22	46,38	25,29	2,36
POLVO	700	90	50	52,43	0,561	18,54	11,15	35,70	53,15	69,33	2,74
GRANULAR	500	60	25	47,82	0,259	17,79	16,50	20,58	62,92	22,59	2,42
GRANULAR	500	60	50	49,54	0,300	15,30	13,74	25,35	60,91	31,22	2,38
GRANULAR	500	90	25	47,18	0,260	17,57	18,13	23,95	57,91	15,97	2,39
GRANULAR	500	90	50	47,07	0,323	23,74	12,14	32,96	54,90	41,58	2,57
GRANULAR	700	60	25	44,92	0,258	19,08	12,32	27,84	59,85	15,66	2,41
GRANULAR	700	60	50	48,78	0,305	23,82	12,11	25,67	62,22	46,08	2,51
GRANULAR	700	90	25	44,98	0,256	19,59	13,61	26,10	60,29	20,48	2,46
GRANULAR	700	90	50	45,11	0,303	26,70	12,57	27,39	60,04	50,80	2,81

2. ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO

2.1. RENDIMIENTO DE LA ACTIVACIÓN

En la Tabla 17 se muestran los valores promedio de grado de activación y rendimiento en porcentaje de los carbones activados, resultantes de la combinación de tres variables: temperatura, tiempo y concentración de activación.

Tabla 17: Rendimiento y grado de activación de los carbones experimentados

<i>Tipo de Carbón</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Tiempo (minutos)</i>	<i>Concentración de Ácido Fosfórico (% P/P)</i>	<i>Muestra</i>	<i>Rendimiento (%)</i>	<i>Grado de Activación (%)</i>
POLVO	500	60	25	M 1	53,68	46,32
			50	M 2	55,40	44,60
		90	25	M 3	52,31	47,69
			50	M 4	55,49	44,51
	700	60	25	M 5	53,81	46,19
			50	M 6	53,88	46,12
		90	25	M 7	51,49	48,51
			50	M 8	52,43	47,57
GRANULAR	500	60	25	M 9	47,82	52,18
			50	M 10	49,54	50,46
		90	25	M 11	47,18	52,82
			50	M 12	47,07	52,93
	700	60	25	M 13	44,92	55,08
			50	M 14	48,78	51,22
		90	25	M 15	44,98	55,02
			50	M 16	45,11	54,89

Conforme a los datos mostrados en la Tabla 17 y Figura 23 se observa que, para ambos tipos de carbón (granular y en polvo) el rendimiento es inversamente proporcional con respecto al tamaño de partícula de carbón activado. Coincide con Ramírez citado por Valdiviezo (2012), a mayor grado de activación generalmente corresponde un menor rendimiento, entendiéndose por grado de activación, el área superficial generada en el carbón activado. Este efecto hace que se obtenga menores valores de rendimiento con el carbón activado granular. La porosidad la podemos conocer de manera indirecta por grado de activación que se refiere a las pérdidas en la combustión, de manera que para pérdidas por combustión menores a 50 por ciento se obtienen carbones activados microporosos, pérdidas mayores a

75 por ciento, carbones macroporosos; y pérdidas entre 50 y 75 por ciento, el producto obtenido es una mezcla de estructura micro y macroporosa (Dubini citado por Azañero 1988). Por lo tanto las muestras de carbón activado en polvo pertenecen a los carbones microporosos y las muestras de carbón activado granular pertenecen a la mezcla de microporosos y macroporosos.

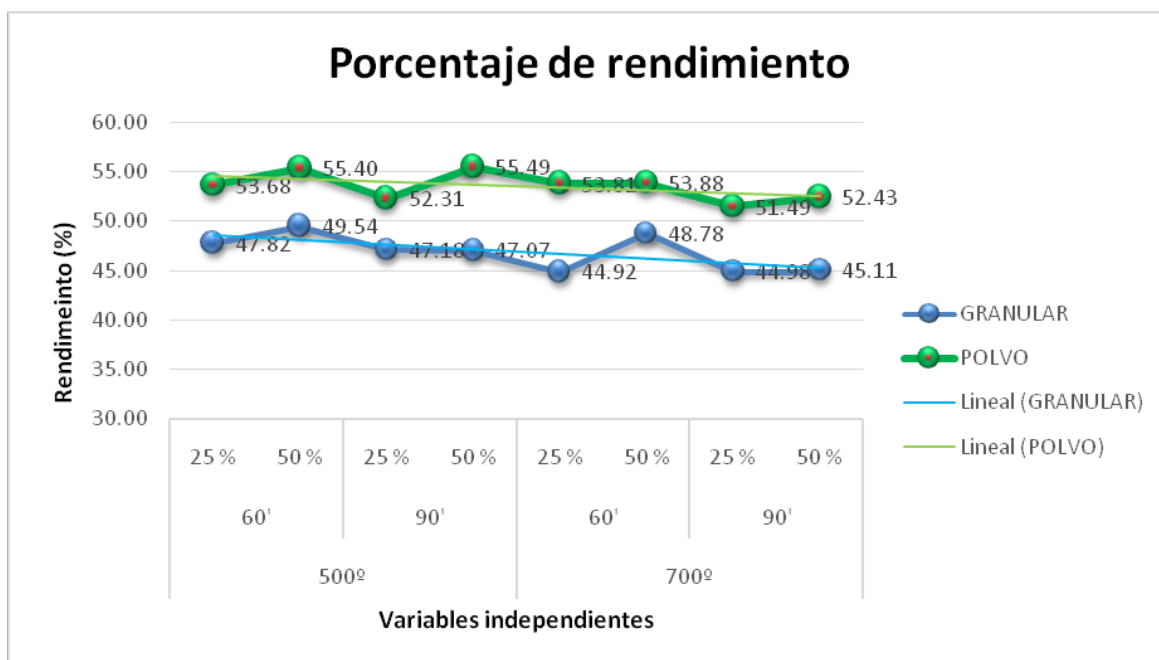


Figura 23: Porcentaje de rendimiento.

Se encontró que el rendimiento del carbón activado en polvo está por encima del carbón activado granular. Además, como ya se mencionó en párrafos anteriores, este efecto permite afirmar que a medida que el tamaño de partícula disminuye se incrementa el rendimiento del carbón activado.

Asimismo, se halló que mientras mayor sean la temperatura, concentración en porcentaje P/P de H_3PO_4 y el tiempo el rendimiento del carbón activado, tenderá a disminuir.

De acuerdo a los resultados obtenidos el mayor rendimiento corresponde a la muestra M 4 con 55,49 por ciento para el carbón en polvo y la muestra M 10 con 49,54 por ciento para el carbón granular, mientras que el menor rendimiento se encontró en la muestra M 9 con 51,49 por ciento para el carbón en polvo y para la muestra M 13 con 44,92 por ciento para el carbón granular.

En relación a las pruebas estadísticas (como se muestra en la Figura 24), se demuestra que no existe ninguna interacción significativa de las variables durante el proceso de activación

del carbón. Por el contrario, cada una de estas variables - temperatura (500°C / 700°C), tiempo (60 min. /90 min.) y concentración (25 por ciento / 50 por ciento) - independientemente producen distintos rendimientos promedio. Asimismo, este análisis estadístico también demuestra que a medida que la temperatura aumenta de 500 a 700°C, el rendimiento promedio de carbón activado disminuye.

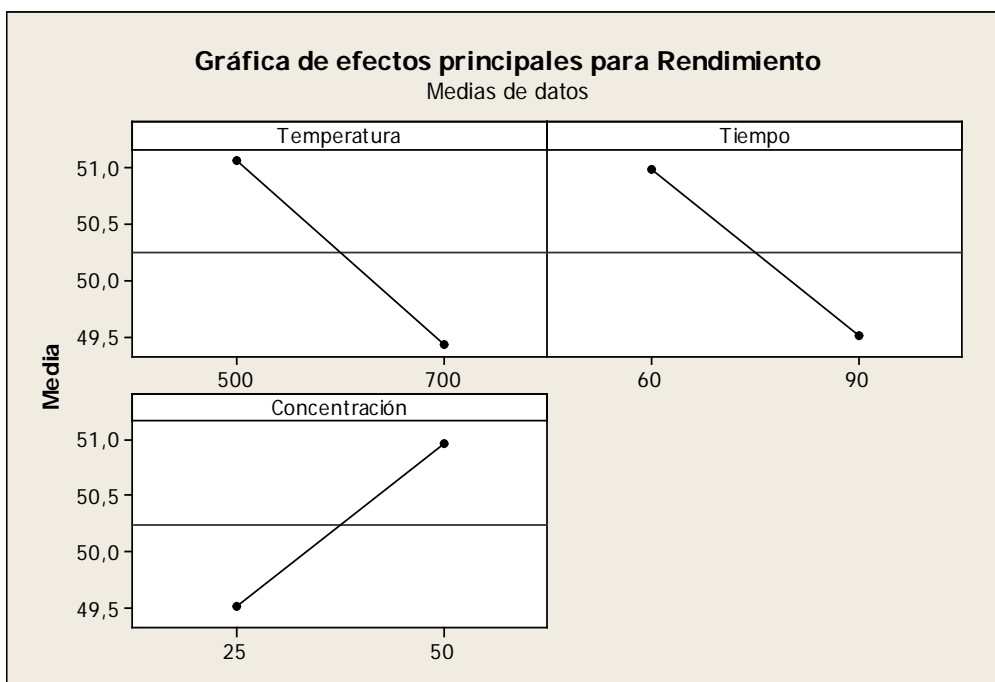


Figura 24: Grafica de efectos principales para Rendimiento.

Por tanto, si la medida del tiempo en los procesos de activación se incrementa, el rendimiento promedio de carbón activado disminuye y por el contrario, si se incrementa la concentración de H_3PO_4 , el rendimiento promedio de carbón activado aumenta. Este escenario es distinto a los dos resultados mencionados anteriormente ya que en ambos el promedio de rendimiento de carbón activado disminuye.

2.2. DENSIDAD APARENTE (G/CM³)

En los resultados de las muestras obtenidas se observó que para ambos tipos de carbón (granular y en polvo) la temperatura es directamente proporcional a la densidad aparente ya que se observó que a mayor temperatura de activación, se obtuvo una mayor densidad aparente del carbón.

En el carbón granular, los mayores valores se encontraron en la muestra M 12 a una temperatura de 500°C, concentración de 50 por ciento de H_3PO_4 y a 90 minutos de activación, se logró obtener el valor de 0,323 g/cm³ de densidad aparente. El carbón activado

en polvo expuesto a la misma concentración y tiempo de activación pero a una temperatura de 700°C presentó la mayor densidad aparente en la muestra M 8 con un valor de 0,561 g/cm³.

Los menores valores registrados para ambos tipos de carbon corresponden a una temperatura de 90°C y una concentración de 25 por ciento de H₃PO₄; donde el carbón activado granular a un tiempo de 90 minutos de activación presenta una densidad aparente de 0,256 g/cm³ para la muestra M 15; y el carbón activado en polvo a un tiempo de 60 minutos corresponde 0,386 g/ cm³ para la muestra M 1.

En la Figura 25, se muestra que los carbones sometidos a iguales condiciones de ensayo (variables temperatura, tiempo y concentración) resultan tendencias constantes donde el carbón activado en polvo presenta mayor densidad aparente (g/cm³) que el carbón activado granular; asimismo la densidad aparente es inversamente proporcional al tipo de carbón (en polvo o granular). Este hallazgo coincide con Layseca (2001) que sostiene que a menor granulometría o tamaño de partícula, mayor densidad aparente.

Si se compara los resultados anteriormente mencionados con la NTP (1982) y la NMX (1981) donde sostienen que la densidad aparente g/cm³ de un carbón activado debe estar en el rango de 0,35 – 0,40 g/cm³, sobre el cual podemos comprobar que las muestras M 1 y M 5 (ambas carbón activado en polvo, ver resultados en la Figura 25 resaltados con rojo) cumplen en estricto con este requisito.

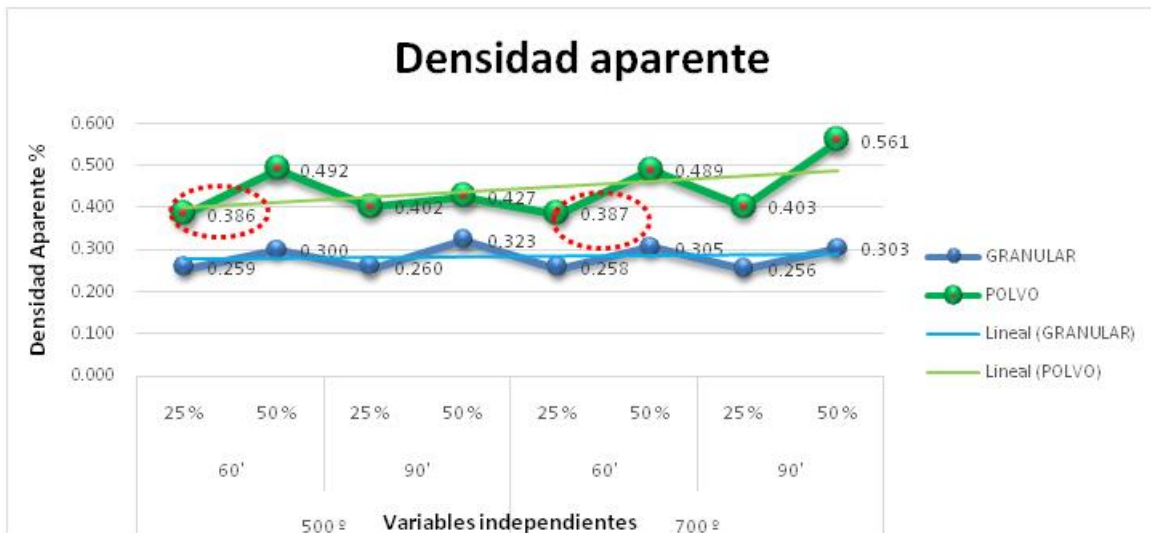


Figura 25: Densidad aparente.

El análisis estadístico demostró que ninguna interacción de los factores (temperatura, tiempo y concentración) es significativa, y sólo los niveles de concentración (25 y 50 por ciento) producen diferentes densidades aparentes promedio (g/cm^3) de carbón activado. No obstante tendremos una densidad aparente mayor con un tiempo de 90 min. a una concentración de 50 por ciento y a una combinación de una temperatura de 700°C y 50 por ciento de concentración.

Correlativamente, el análisis determinó que los efectos principales de cada factor (temperatura, tiempo y concentración), tiene distintos efectos como (ver la Figura 26) el análisis estadístico demostró que ninguna interacción de los factores (temperatura, tiempo y concentración) es significativa, y sólo los niveles de concentración (25 y 50 por ciento) producen diferentes densidades aparentes promedio (g/cm^3) de carbón activado. No obstante tendremos una densidad aparente mayor con un tiempo de 90 min. a una concentración de 50 por ciento y a una combinación de una temperatura de 700°C y 50 por ciento de concentración.

Correlativamente, el análisis determinó que los efectos principales de cada factor (temperatura, tiempo y concentración), tiene distintos efectos como (ver la Figura 26):

- A medida que la temperatura aumenta de 500 a 700°C, la densidad aparente promedio de carbón activado aumenta levemente.
- A medida que aumenta el tiempo de proceso de activación, la densidad aparente promedio de carbón activado se mantiene casi constante.

- Por último, a una mayor concentración de H_3PO_4 da como consecuencia que la densidad aparente promedio de carbón activado aumente en $0,07g/cm^3$ de manera significativa.

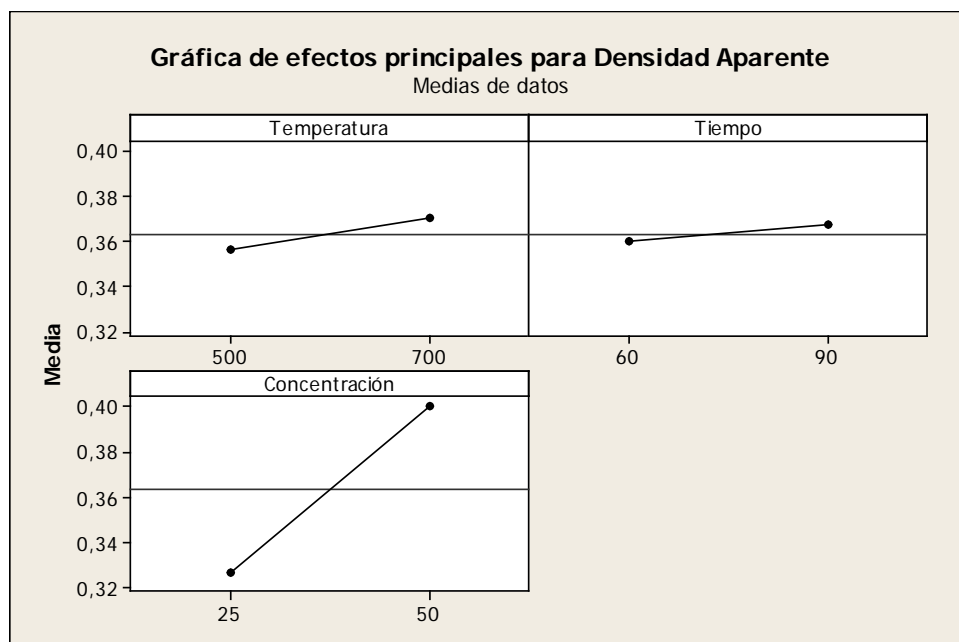


Figura 26: Gráfica de efectos principales para densidad aparente.

2.3. CONTENIDO DE HUMEDAD (CH%)

Considerando que en la NTP (1982) y la NMX-295-1981 donde el máximo es de 12 por ciento de contenido de humedad y en esta misma línea Hassler (1973) sostiene que el contenido de humedad especificado para carbones activados destinados para el comercio es de 3,8 a 12 por ciento, estos parámetros son superados por los obtenidos en los ensayos de ambos tipos de carbón, ya que el contenido de humedad promedio es mayor a lo estipulado por la norma. Sin embargo, Hassler (1973) también sostiene que el contenido de humedad no afectaría el poder de adsorción del carbón.

Por lo tanto, según lo obtenido en el ensayo y el análisis respectivo (ver Figura 27) se observa que la tendencia del contenido de humedad es constante y ascendente. Asimismo, se muestra que el carbón activado granular presenta mayor contenido de humedad.

Por lo descrito, podemos sostener que el tipo de carbón es directamente proporcional al contenido de humedad promedio.

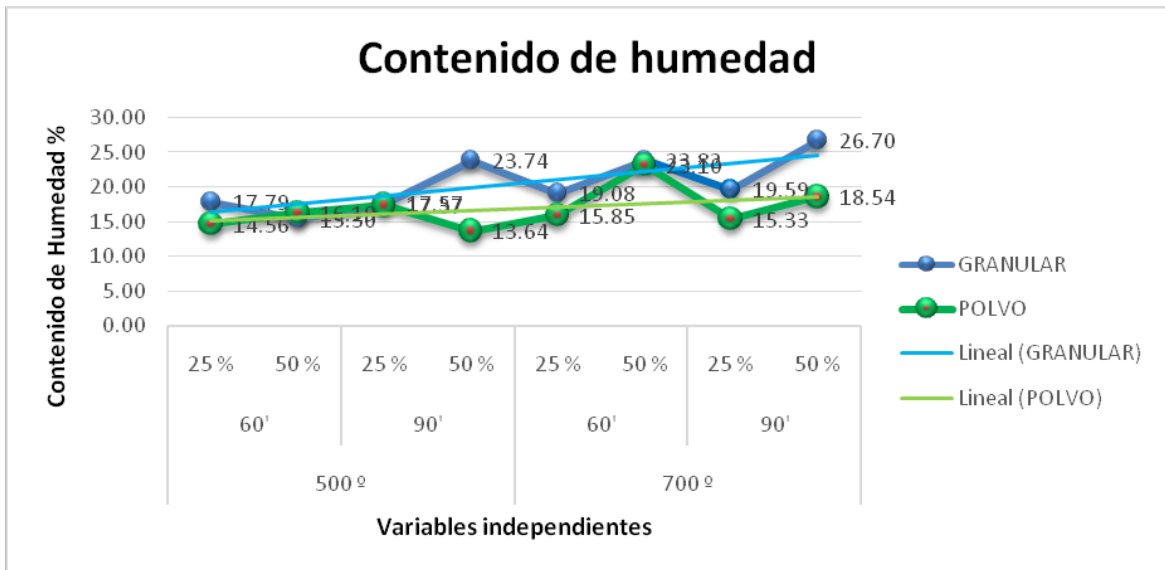


Figura 27: Porcentaje de contenido de humedad.

Si recurrimos al detalle del análisis estadístico realizado, se muestra que ninguna interacción de factores (temperatura, tiempo y concentración) del estudio es significativa y solo los distintos niveles de la temperatura (500 y 700°C) producen diferentes contenidos de humedad promedio. De igual importancia, el análisis estadístico muestra que se puede lograr un menor contenido de humedad a una temperatura de 500°C y una concentración de 25 por ciento y a un tiempo de 60 minutos y una concentración de 25 por ciento.

Asimismo, producto de cada experimentación se desarrolló un análisis de efectos principales para cada factor (temperatura, tiempo y concentración) sobre lo cual se sostiene que a medida que se incrementa la temperatura y la concentración de H₃PO₄, el contenido de humedad promedio también aumenta de manera considerable. También se concluye que a medida que se incrementa el tiempo el contenido de humedad aumenta levemente en 0,85 por ciento (ver Figura 28). Al considerar lo sostenido por La Chira (2010), que a menor humedad, mayor será la capacidad de adsorción del carbón se puede sostener que el carbón obtenido presenta un nivel aceptable de adsorción; pese a que ello no necesariamente cumple con los parámetros de las normas nacionales ni mexicanas así como las expectativas de los comercializadores.

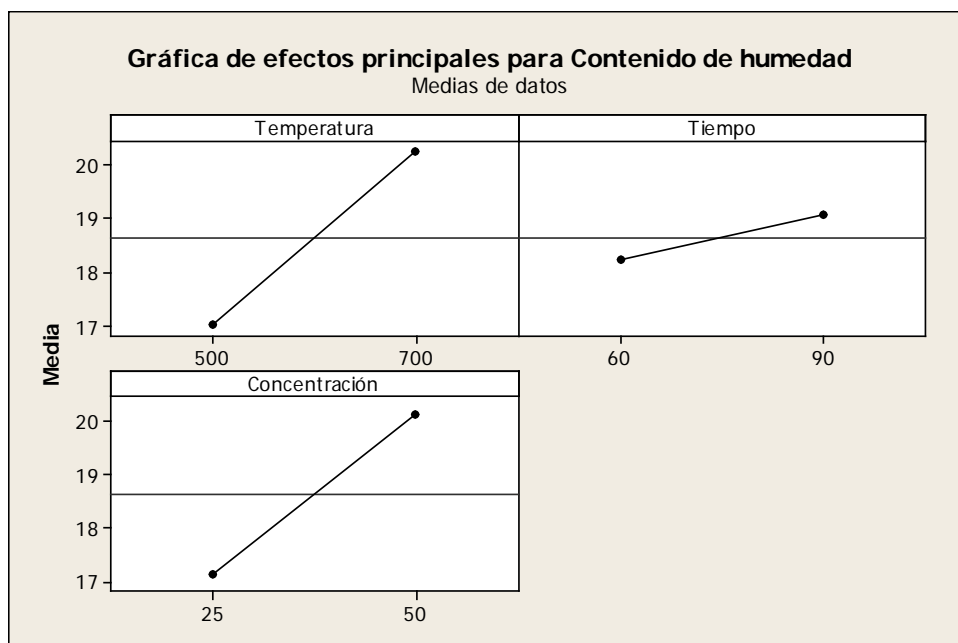


Figura 28: Gráfica de efectos principales para contenido de humedad.

2.4. MATERIAL VOLÁTIL (MV%)

Si observamos la Figura 29, se muestra una tendencia decreciente del porcentaje de material volátil promedio para ambos tipos de carbón activado (granular y en polvo). Los promedios más altos para el carbón activado granular y en polvo obtenidos son de la muestra M 11 con 18,13 por ciento y la muestra M 3 con 19,10 por ciento respectivamente y se dan a 500°C, 90 minutos y 25 por ciento de concentración de H₃PO₄ de activación. Los promedios más bajos obtenidos son de la muestra M 14 con 12,11 por ciento y la muestra M 6 con 9,64 por ciento respectivamente, y se dan a 700°C, 60 minutos y 50 por ciento de concentración de H₃PO₄ de activación.

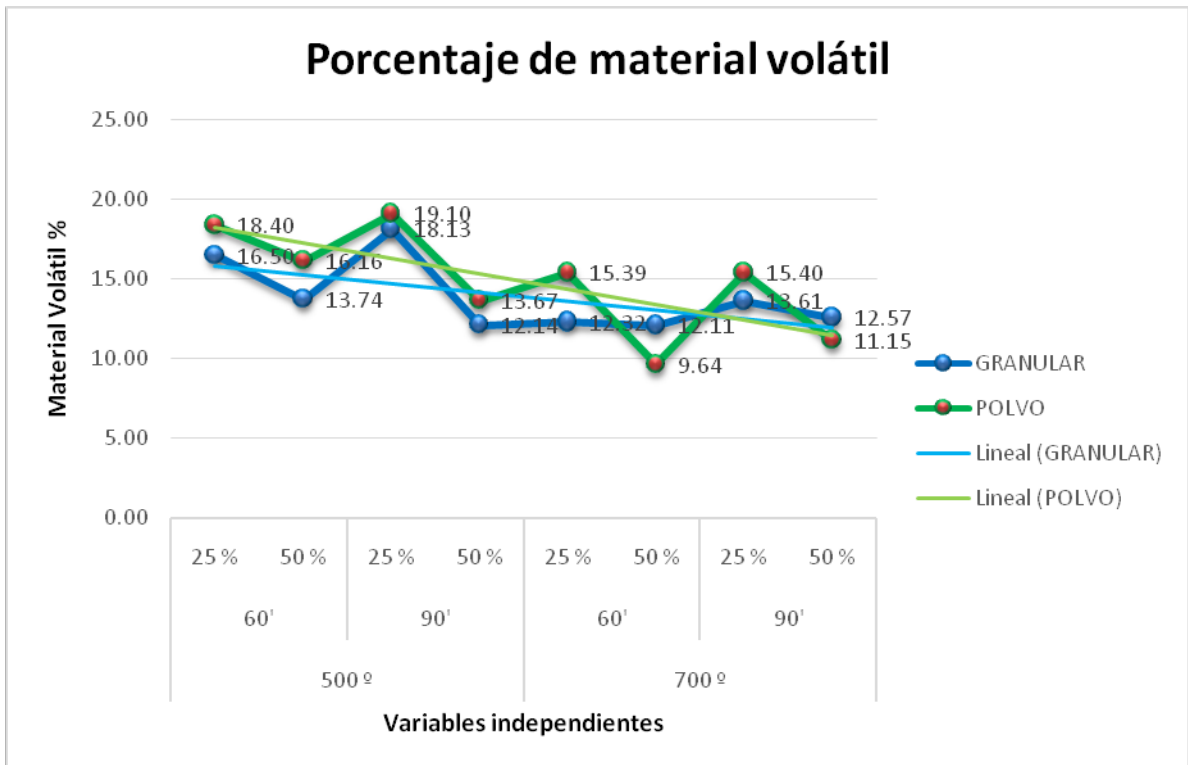


Figura 29: Porcentaje de material volátil.

En base al análisis estadístico se muestra que no hay interacción significativa de los factores de estudio (temperatura, tiempo y concentración), así los distintos niveles de temperatura (500 y 700°C) y concentración (25 y 50 por ciento) de manera independiente producen diferentes cantidades de material volátil de carbón activado. De igual importancia se desarrolló un análisis descriptivo de cada factor (temperatura, tiempo y concentración) con lo cual se sostiene, que mientras la temperatura y la concentración de H_3PO_4 aumenta, el material volátil promedio del carbón activado disminuye considerablemente (ver Figura 30). De forma similar Hassler (1974), afirma que a mayor temperatura de activación el contenido de material volátil disminuye. Por consiguiente Layseca (2001), menciona que a medida que el carbón activado tenga menos material volátil, tendrá mayor espacio vacío en su estructura interna y esto lleva a que tenga mayor área para su capacidad de adsorción. Sin embargo, el factor tiempo no ocasiona cambios importantes en la materia volátil promedio.

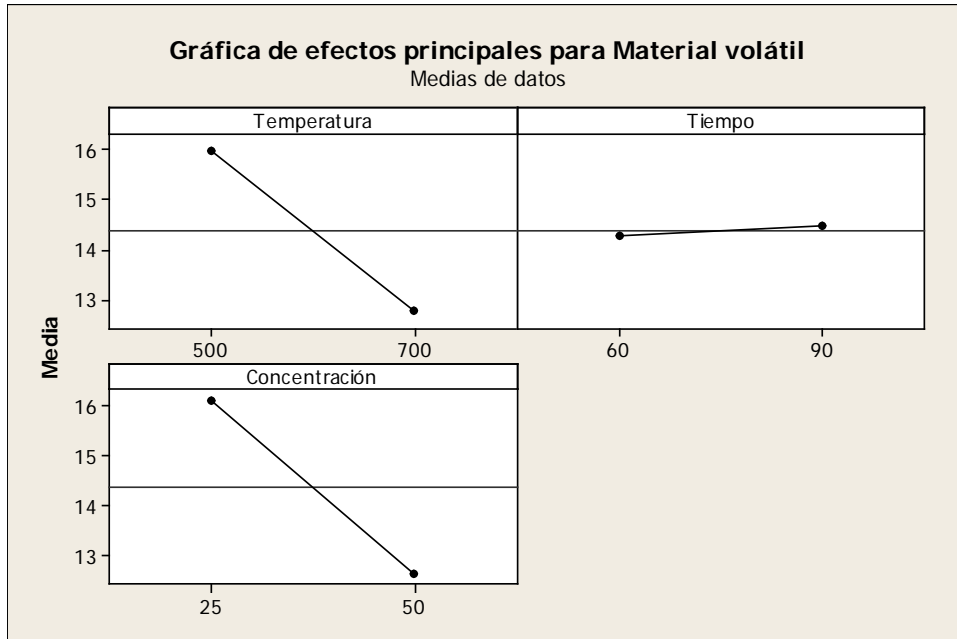


Figura 30: Gráfica de efectos principales para material volátil.

2.5. CONTENIDO DE CENIZAS (CZ%)

El contenido de cenizas se encuentra por encima del rango establecido para carbones activados comerciales es decir, por encima de 12 por ciento como lo indica la NTP (1982) y la NMX (1981).

La tendencia es creciente para ambos tipos de carbón activado (granular y en polvo) siendo mayor el contenido de cenizas por parte del carbón activado. También podemos observar que los promedios más altos para el carbón activado en polvo son de la muestra M 6 con 39,24 por ciento y 32,96 por ciento para la muestra M 12 de carbón granular. Sometidos respectivamente a 700°C, 60 minutos, 50 por ciento de concentración de H_3PO_4 y 500°C, 90 minutos y 50 por ciento de concentración de H_3PO_4 de activación (ver Figura 31).

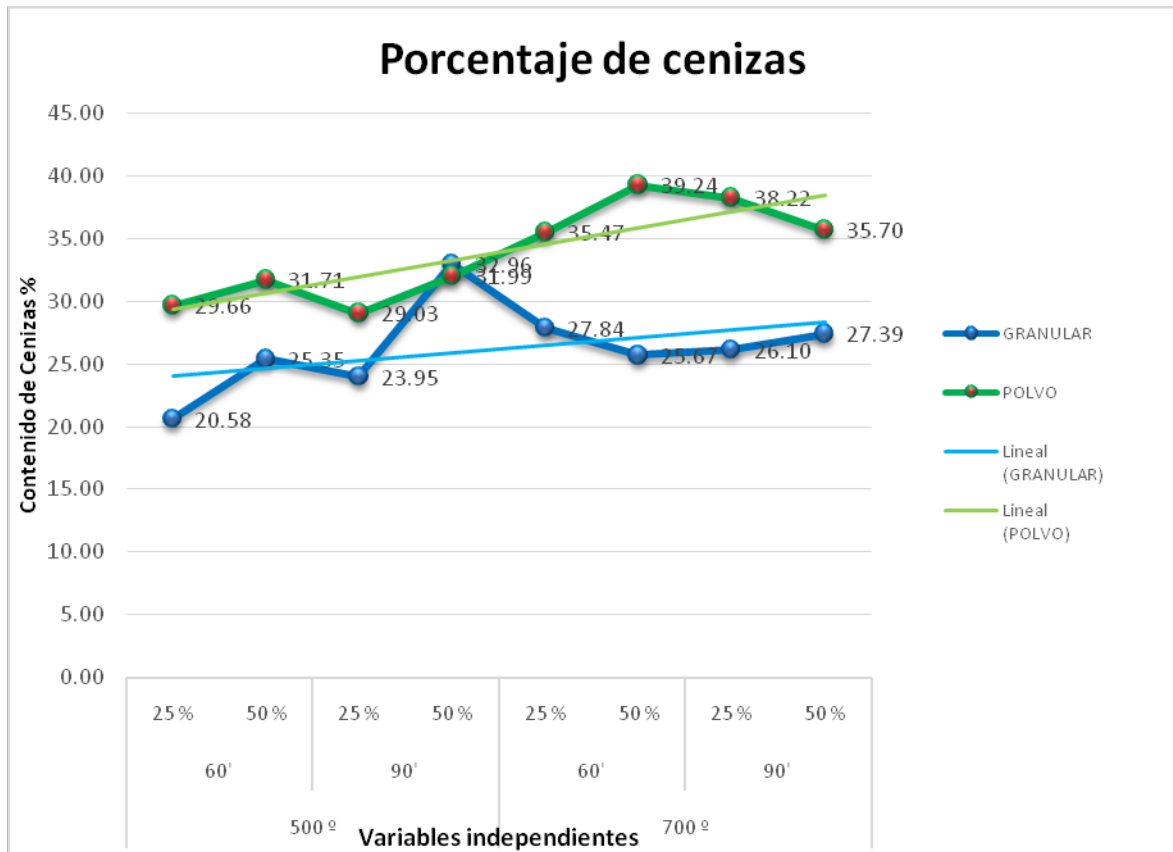


Figura 31: Porcentaje de cenizas.

De igual importancia es lo que señala Azañero (1988), experimental en su estudio a base de madera de algarrobo (*Prosopis pallida*), donde demostró que el carbón de partículas más finas eran las que mayor porcentaje de cenizas tenían. En esta misma lógica el presente estudio encuentra comportamientos similares ya que el carbón en polvo obtenido presenta valores porcentuales más altos en contenido de cenizas que el carbón granular.

Además, según el análisis estadístico obtenido para el análisis de contenido de cenizas se muestra que no hay ninguna interacción significativa de los factores de estudio (temperatura, tiempo y concentración), así los distintos niveles de la temperatura (500 y 700°C) producen diferentes contenidos de cenizas promedio. De igual importancia, el análisis estadístico muestra que se obtiene un menor contenido de cenizas con 500°C y 60 minutos, 25 por ciento de concentración y 60 minutos y con 500°C y 25 por ciento de concentración.

Asimismo desarrollamos un análisis descriptivo de cada factor (temperatura, tiempo y concentración) donde se observa que a medida que la temperatura, concentración de H₃PO₄ y tiempo aumentan, el contenido de cenizas promedio de carbón activado también aumenta (ver Figura 32).

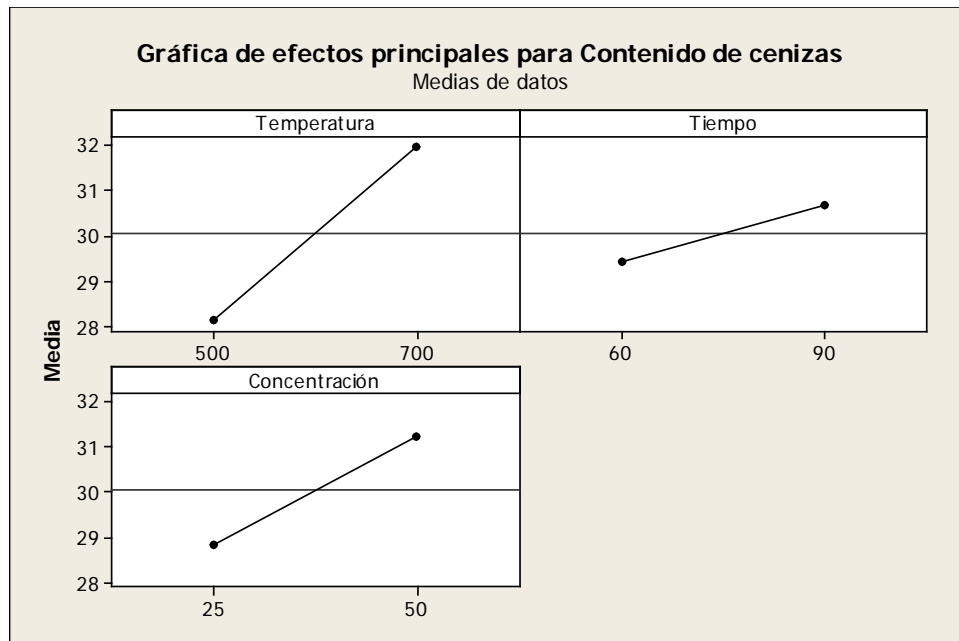


Figura 32: Gráfica de efectos principales para contenido de cenizas.

2.6. CARBONO FIJO (CF%)

En la Figura 33, se muestra la tendencia medianamente constante del contenido de carbono fijo la cual es mayor para el carbón activado granular. La muestra M 9 de carbón granular tiene un promedio máximo de 62,92 por ciento a una temperatura de 500°C, concentración de 25 por ciento de H₃PO₄ y a 60 minutos de activación; asimismo, la muestra M 4 de carbón activado en polvo presenta 54,35 por ciento de carbono fijo la que se da a una temperatura de 500°C, concentración de 50 por ciento de H₃PO₄ y a 90 minutos de activación.

Los menores valores de carbono fijo promedio registrados fue de la muestra M 12 con 54,90 por ciento a 500°C, 90 minutos y 50 por ciento de H₃PO₄ para el carbono activado granular y la muestra M 7 con 46,38 por ciento a 700°C, 90 minutos y 25 por ciento de H₃PO₄ para el carbono activado en polvo.

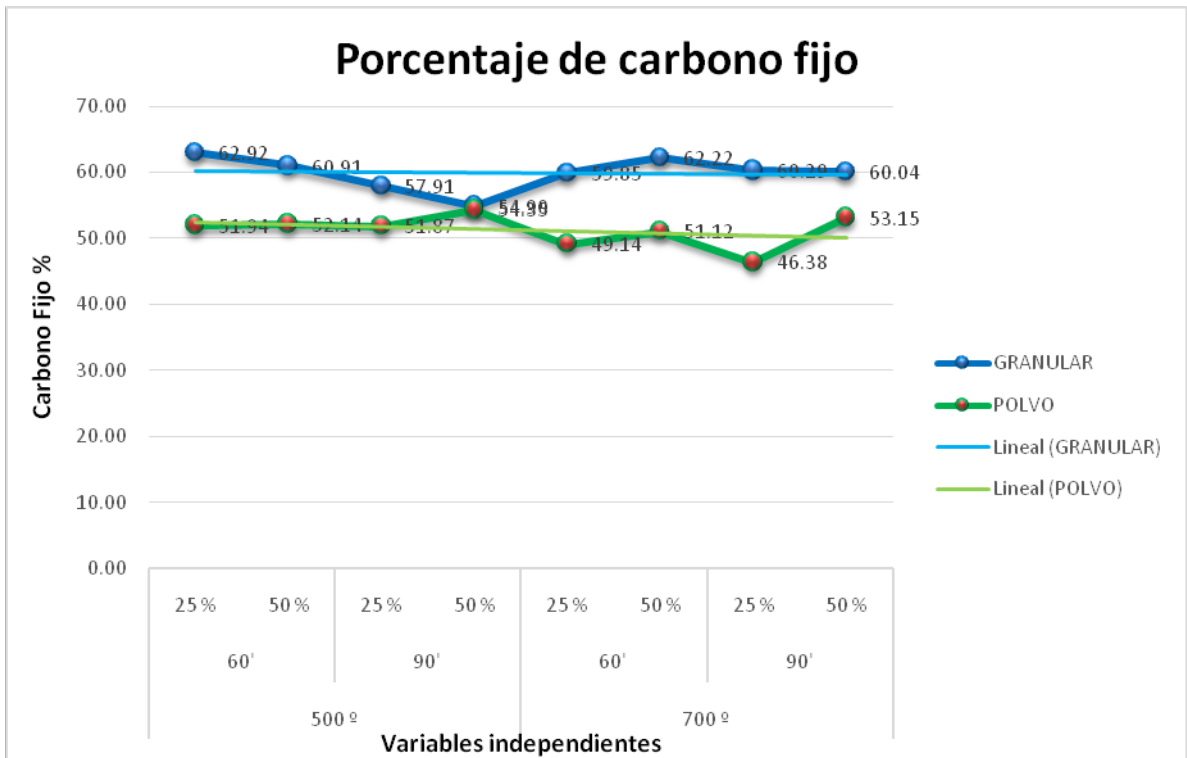


Figura 33: Porcentaje de carbono fijo.

De esta misma manera, el análisis estadístico demostró que ninguna interacción de factores (temperatura, tiempo y concentración) es significativa, de modo similar ninguno de los niveles (500°C / 700°C - 60 minutos / 90 minutos – 25 por ciento / 50 por ciento) de los factores producen diferentes cantidades de carbono fijo promedio. No obstante se logra una mayor cantidad de carbono fijo con: 500°C, a 60 minutos y/o con 50 por ciento de concentración a 60 minutos.

Además, producto de cada experimento se desarrolló un análisis de efectos principales de cada factor (temperatura, tiempo y concentración), con lo cual se sostiene que, a medida que la temperatura y el tiempo de proceso de activación aumentan, el carbono fijo promedio disminuye. Por último, y no menos importante, se halló que a medida que la concentración de H_3PO_4 se incrementa, también se incrementa el carbono fijo promedio, esto último nos lleva a sostener que el incremento de la concentración de H_3PO_4 es directamente proporcional al carbono fijo (ver Figura 34).

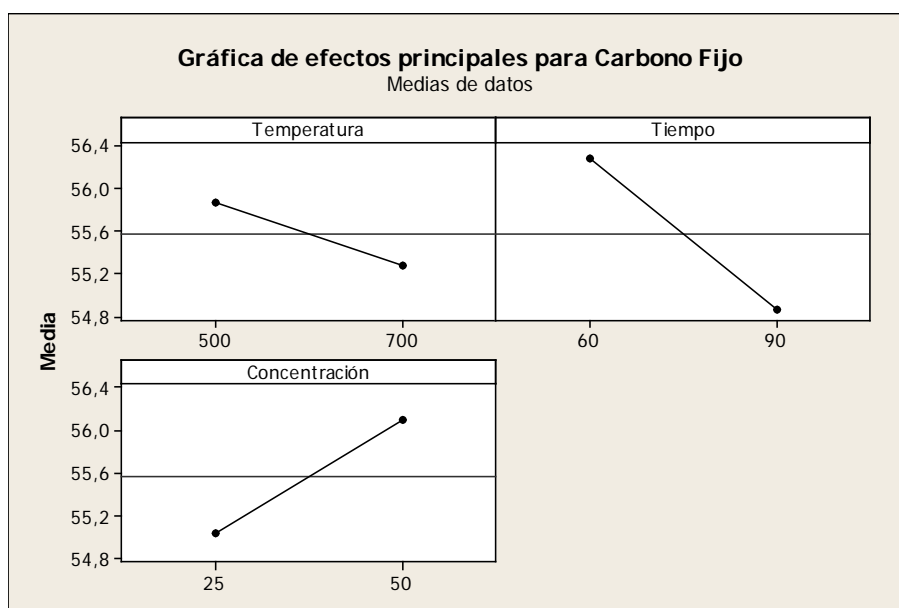


Figura 34: Gráfica de efectos principales para carbono fijo.

2.7. ADSORCIÓN DEL AZUL DE METILENO (ADS%)

En la Figura 35, se muestra la tendencia creciente de adsorción del azul de metileno en cada una de las muestras de carbón activado (granular y en polvo) donde el carbón activado en polvo presenta mayor porcentaje de adsorción.

Los promedios más altos para el carbón activado en polvo y granular son de 69,33 por ciento de la muestra M 8 y 50,80 por ciento de la muestra M 16 respectivamente y se dan a 700°C, 90 minutos y 50 por ciento de concentración de H₃PO₄ de activación. Los promedios más bajos obtenidos para carbón activado en polvo y granular son de 18,75 por ciento de la M 1 y 15,66 por ciento de la M 13 respectivamente y se dan a 500°C / 700°C, 60 minutos y 25 por ciento de concentración de H₃PO₄ de activación respectivamente.

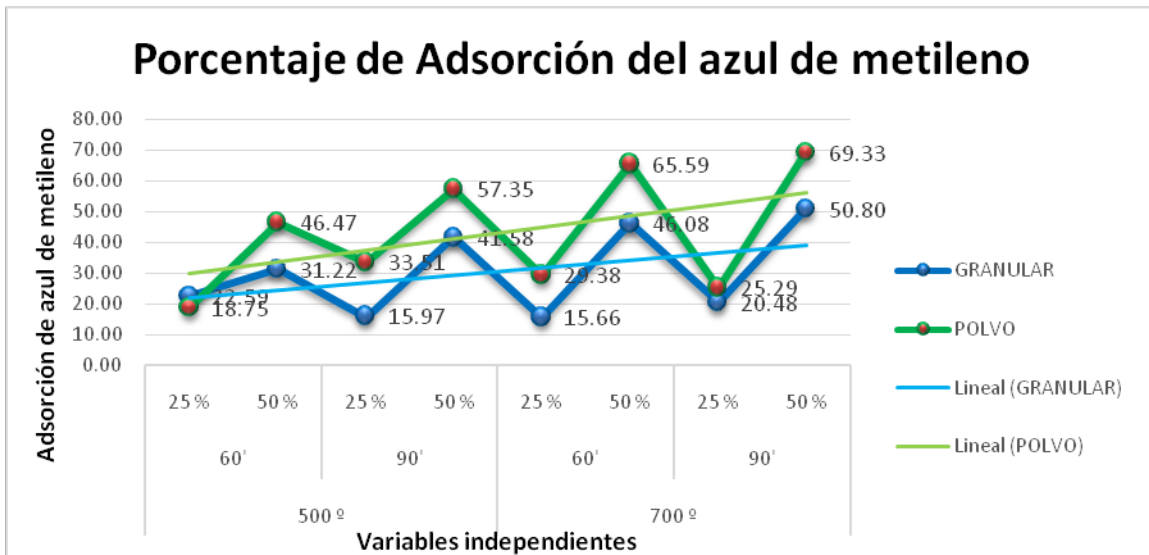


Figura 35: Porcentaje de adsorción del azul de metileno.

Además los análisis estadísticos, muestran que a un nivel de significación de 0,05 donde $p\text{valor} = 0,046 < 0,05$ se afirma que existe interacción entre la temperatura y la concentración al analizar la adsorción del azul de metileno. Por lo tanto se realizó un análisis de efectos simples de los factores (temperatura, tiempo y concentración) del proceso de activación. Así se ha verificado que hay la suficiente evidencia estadística para afirmar que:

- Existe diferencia en la adsorción promedio del azul de metileno en los niveles de temperaturas (500 y 700°C) cuando la concentración es 25 por ciento.
- Las temperaturas de 500 y 700°C producen diferentes promedios de adsorción del azul de metileno cuando la concentración es 50 por ciento.
- En el primer y segundo nivel de concentración (25 y 50 por ciento) existe diferencia en la adsorción media de azul de metileno cuando la temperatura es 500°C.
- Las concentraciones al 25 por ciento y 50 por ciento producen diferentes promedios de adsorción del azul de metileno cuando la temperatura es 500°C.
- Existe diferencia en la adsorción promedio del azul de metileno en los niveles de la concentración cuando la temperatura es 700°C.
- Las concentraciones al 25 por ciento y 50 por ciento producen diferentes promedios de adsorción del azul de metileno cuando la temperatura es 700°C. Por lo cual la

investigación evidencio que la absorción es mayor a 700°C que a 500°C, cuando la concentración es 50 por ciento.

- A un nivel de significación de $\alpha=0,05$, se puede afirmar que la adsorción promedio del azul de metileno usando el nivel de temperatura de 700°C es superior a la adsorción promedio del azul de metileno a 500°C cuando la concentración es 50 por ciento.
- A medida que, la temperatura, la concentración de H_3PO_4 y el tiempo aumentan, la adsorción de azul de metileno promedio de carbón activado aumentan. Por tanto se deduce que el incremento de la adsorción del azul de metileno es directamente proporcional al incremento de los factores (ver Figura 36).

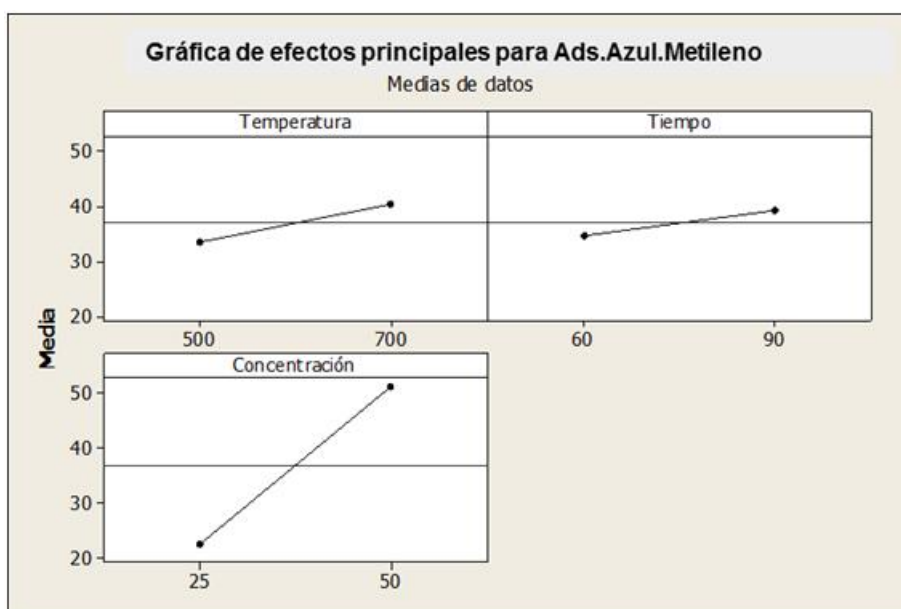


Figura 36: Gráfica de efectos principales para adsorción de azul de metileno.

2.8. PH

En la Figura 37, se muestra la tendencia creciente del pH en cada una de las muestras de carbón activado (granular y en polvo); donde el carbón activado granular presenta un pH menos ácido.

Los promedios con menor acidez para el carbón activado granular y en polvo son de la muestra M 16 con un pH =2,81 y de la muestra M 8 con un pH =2,74 respectivamente y se dan a 700°C, 90 minutos y 50 por ciento de concentración de H_3PO_4 de activación. Los promedios mayor grado de acidez obtenidos para carbón activado granular y en polvo son de la muestra M 10 con un pH =2,38 y de la muestra M 1 con un pH =2,29 y se dan a

500°C, 60 minutos y 25 por ciento /50 por ciento de concentración de H₃PO₄, respectivamente.

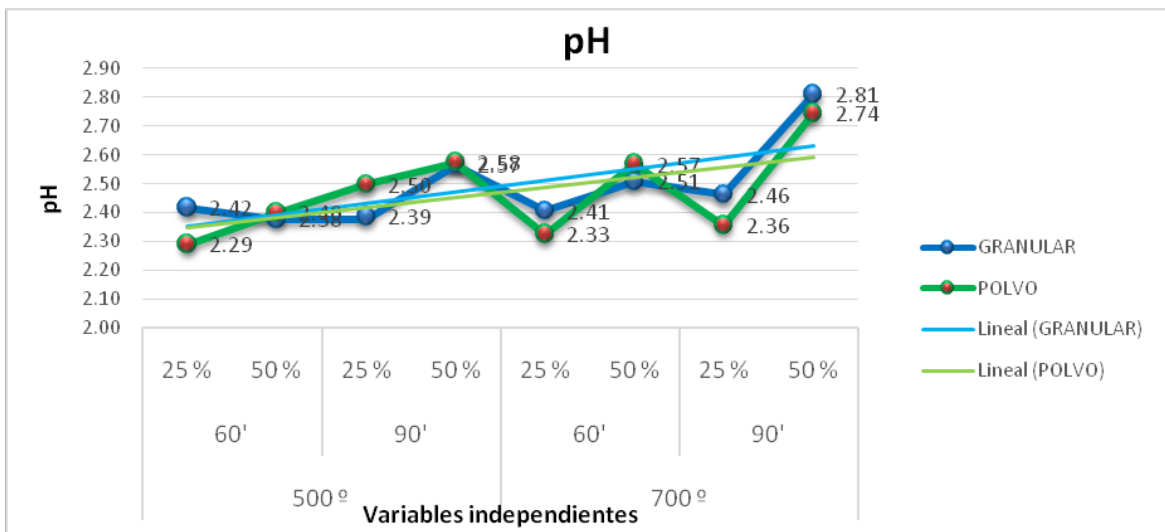


Figura 37: Nivel de pH.

El análisis estadístico muestra que a un nivel de significación de $p_{valor} = 0,05$ donde $p_{valor} = 0,017 < 0,05$ se afirma que existe interacción entre la temperatura y la concentración al analizar la lectura de pH promedio. Asimismo a un nivel de significación de $p_{valor} = 0,05$ donde $p_{valor} = 0,048 < 0,05$ se afirma que existe interacción entre el tiempo y la concentración al analizar la lectura de pH promedio. Por lo tanto se efectuó un análisis de efectos simples de los factores (temperatura, tiempo y concentración) del proceso de activación (ver Figura 34). Logrando verificar que existe suficiente evidencia estadística para afirmar que:

- Existe diferencia en la lectura pH promedio a temperatura de ambiente en los niveles de temperaturas (500 y 700°C) cuando la concentración es 50 por ciento. ($p_{valor} = 0,00065 < 0,05$).
- En el primer y segundo nivel de concentración (25 y 50 por ciento) existe diferencia en la lectura pH promedio a temperatura de ambiente cuando la temperatura es 500°C. ($p_{valor} = 0,0289 < \alpha = 0,05$).
- Las concentraciones al 25 por ciento y 50 por ciento producen diferente lectura pH promedio cuando la temperatura es 500°C. ($p_{valor} = 0,0289 < \alpha = 0,05$).
- Existe diferencia en los niveles de la concentración cuando la temperatura es 700°C. ($p_{valor} = 4,6263 \cdot 10^{-5} < \alpha = 0,05$).

- Las concentraciones al 25 por ciento y 50 por ciento producen diferente lectura pH promedio cuando la temperatura es 700°C. (pvalor = $4,6263 \cdot 10^{-5} < \alpha=0,05$).
- A un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que la lectura de pH del nivel de concentración de 50 por ciento es superior a la lectura de pH del nivel de concentración 25 por ciento, cuando la temperatura es de 500°C. (pvalor= $0,0101 < \alpha=0,05$).
- A un nivel de significación de 0,05, se puede afirmar que la lectura de pH a una temperatura de 700°C es superior a la lectura de pH promedio de 500°C cuando la concentración es 50 por ciento. (pvalor= $0,00039 < \alpha=0,05$).
- Existe diferencia en la lectura pH promedio en los niveles de tiempo cuando la concentración es 50 por ciento. (pvalor= $0,00022 < \alpha=0,05$).
- Se puede afirmar que los tiempos de 60 y 90 minutos producen resultados diferentes en la lectura de pH promedio cuando la concentración es de 50 por ciento. (pvalor= $0,00022 < \alpha=0,05$).
- El primer y segundo nivel de concentración existe diferencia en la lectura pH promedio cuando el tiempo es de temperatura es 60 minutos. (pvalor= $0,0114 < \alpha=0,05$)
- Las concentraciones al 25 y 50 por ciento producen diferente lectura pH promedio cuando el tiempo del proceso es 60 minutos. (pvalor= $0,0114 < \alpha=0,05$)
- El primer y segundo nivel de concentración existe diferencia en la lectura pH promedio cuando el tiempo es de 90 minutos. (pvalor = $7,6396 \cdot 10^{-5} < \alpha=0,05$).
- Las concentraciones al 25 por ciento y 50 por ciento producen diferente lectura pH promedio cuando el tiempo del proceso es 90 minutos. (pvalor = $7,6396 \cdot 10^{-5} < \alpha=0,05$).
- La lectura de pH promedio a una concentración del 50 por ciento es superior a la lectura de pH promedio a una concentración del 25 por ciento cuando el tiempo del proceso de activación es de 90 minutos. (pvalor= $4,076644e-05 < \alpha=0,05$).
- La lectura de pH promedio a 90 minutos es superior a la lectura de pH promedio a 60 minutos cuando la concentración es de 50 por ciento. (pvalor= $0,000107897 < \alpha=0,05$).

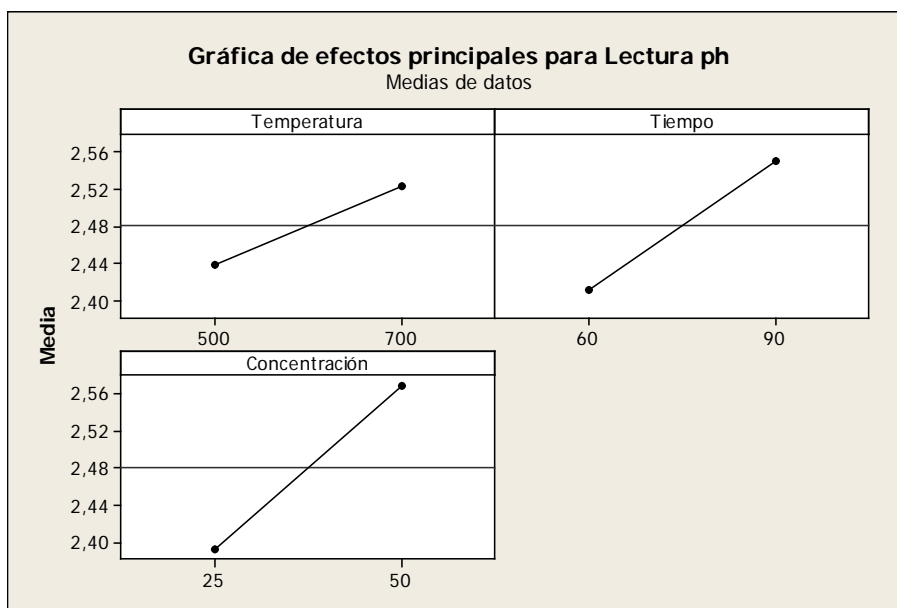


Figura 38: Gráfica de efectos principales para lectura pH.

En concordancia con los resultados expuestos, Sax (1979) sostiene la existencia de mayor grado de toxicidad del cloruro de zinc frente al ácido fosfórico lo cual fortaleza los resultados del presente estudio referente al adecuado uso del ácido fosfórico como agente activante; además que colaboramos al cuidado del medio ambiente.

A su vez Hassler (1973), quien sostiene que los valores de pH serán afectados por las condiciones experimentales.

Según Claudino (2003), demostró que con el aumento de la temperatura, los carbones activados adquieren gradualmente un pH básico. Esto ocurre debido al aumento de la concentración de grupos que confieren un carácter básico a los carbones.

3. DETERMINACIÓN DE CALIDAD DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO

La determinación de la calidad se evaluó de acuerdo a la NMX (1981), calificación al carbón, de manera positiva (+) o negativa (-), si cumplía o no, con los requisitos de la norma respectivamente.

En la Tabla 18, se observa los resultados obtenidos, se colocó la calificación correspondiente a cada ensayo: calificación positiva (+), si se encuentra dentro de los parámetros establecidos por la norma (Anexo 9) y calificación negativa (-) si el resultado se encontraba fuera del rango establecido por la norma.

Tabla 18: Evaluación de los carbones activados obtenidos en el presente estudio de acuerdo a la norma NMX-295-1981

<i>Tipo de Carbón</i>	<i>Código</i>	<i>NMX - 295 - 1981</i>			
		CH % ≤ 12,0	Cenizas % ≤ 12,0	Dap (g/m ³) ≤ 0,4	pH 6,0 - 8,5
POLVO	M 1	-	-	+	-
	M 2	-	-	-	-
	M 3	-	-	-	-
	M 4	-	-	-	-
	M 5	-	-	+	-
	M 6	-	-	-	-
	M 7	-	-	-	-
	M 8	-	-	-	-
<i>Tipo de Carbón</i>	<i>Código</i>	<i>NMX - 295 - 1981</i>			
		CH % ≤ 12,0	Cenizas % ≤ 12,5	Dap ≤ 0,46	pH 5,5 - 8,0
GRANULAR	M 9	-	-	+	-
	M 10	-	-	+	-
	M 11	-	-	+	-
	M 12	-	-	+	-
	M 13	-	-	+	-
	M 14	-	-	+	-
	M 15	-	-	+	-
	M 16	-	-	+	-

Según la Tabla 18, los valores de pH, cenizas totales, densidad aparente (para las muestras M 2, M 3, M 4, M 6, M 7 y M 8) y contenido de humedad no cumplen con la NMX (1981). En este caso, la comparación se realizó teniendo como referencia el carbón activado que mejor se comportó en el análisis de adsorción y por consiguiente con una mayor área

superficial las cuales fueron la muestra M 8 (carbón activado en polvo) y la muestra M 16 (carbón activado granular), ambos obtenidos a 50 por ciento de concentración de agente activante empleando un tiempo de 90 minutos y a una temperatura constante de 700°C.

Sin embargo, estos valores son influenciados, considerando que, para el pH, se puede utilizar alcalinizantes y/o repetir varias veces la operación del lavado del carbón activado, afín de garantizar un valor de pH del carbón cercano al recomendado por norma.

Asimismo la densidad aparente, como se indica en la tabla 18 los carbones activados obtenidos que presentan mayor porcentaje de adsorción, presentan a su vez valores de densidad aparente alta, incluso algunos por encima de lo que establece la norma (como el caso de las muestras M 2, M 3, M 4, M 6, M 7 y M 8).

En cuanto al contenido de humedad, se puede utilizar mayor temperatura de la utilizada (105°C) en la estufa y dejar secar hasta lograr un peso constante durante un tiempo más prolongado.

En cuanto al contenido de cenizas mediante lavados con ácido, lo que se hace en el caso de procesos que se ven afectados por ellas.

Por lo tanto, se puede establecer en términos generales que el carbón activado a partir de residuos generados del aprovechamiento del bambú como son los tallos que sean defectuosos, desechos de las ramas y partes terminales superiores de la *Guadua angustifolia* Kunth, con las modificaciones mencionadas, podría cumplir con la NMX (1981) de los carbones empleados en la industria alimentaria.

V. CONCLUSIONES

- 1) El bambú *Guadua angustifolia* Kunth es un excelente precursor para realizar el proceso de activación por presentar un alto contenido de carbono fijo.
- 2) El rendimiento de las muestras de carbón activado es inversamente proporcional con respecto al tamaño de carbón activado, temperatura, tiempo y concentración. Los carbones activados con mayor poder de adsorción y por consiguiente, con una mayor área superficial corresponde al carbón activado en polvo.
- 3) Según los resultados de grado de activación, se tiene que las muestras de carbón activado en polvo pertenecen a los carbones microporosos y las muestras de carbón activado granular pertenecen a la mezcla de microporosos y macroporosos.
- 4) Las variables independientes temperatura, tiempo y la concentración de activación, así como su interacción, influyeron significativamente en la adsorción del azul de metileno y el pH de los carbones activados obtenidos.
- 5) Las lecturas de pH indicaron que todos los carbones activados presentan características ácidas; por lo tanto, ninguna muestra presentó un pH adecuado para utilizarlo en la refinación de azúcar (la norma exige pH cercano a 7).

VI. RECOMENDACIONES

- Incentivar a los pobladores locales a reforestar con bambú "*Guadua angustifolia* Kunth" e introducir la idea del uso integral de este recurso, y en lugares donde el bambú se presenta de manera natural incentivar a su manejo forestal.
- Utilizar otras variedades de bambúes para la elaboración de carbón activado, a fin de comparar que variedad es la mejor para la obtención de este producto.
- Experimentar con la especie "*Guadua angustifolia* Kunth" a mayores concentraciones de ácido fosfórico, para comprobar el grado de influencia de esta variable en la calidad del producto obtenido.
- Efectuar los análisis de adsorción con compuestos distintos al azul de metileno, pudiendo ser agua o suelos con metales pesados, a fin de plantear un uso directo como potencial insumo para la remediación de recursos.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Añazco, M. 2014. Estudio de la cadena desde la producción al consumo del bambú en Ecuador con énfasis en la especie *Guadua angustifolia*. Quito. EC. 196 p.
- _____. 2015. Estudio de vulnerabilidad del Bambú (*Guadua angustifolia*) al cambio climático en la costa del Ecuador y norte Perú. Quito. EC. 135 p.
- ASTM (American Society for Testing and Materials, USA). 1981. Standard Recommended Practice for Liquid Phase Evaluation of Active Charcoal. Pennsylvania, USA. p. 22 - 26
- _____. 2007. Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. D-1762 - 84. Pennsylvania, USA. 2 p.
- Azañero, I. 1988. Obtención de carbón activado a partir de la madera de algarrobo (*Prosopis pallida*) mediante método físico. Tesis Ing. en Industrias Alimentarias. Lima, PE, UNALM. 122 p.
- Baksi, S.; Biswas, S.; Mahajan, S. 2005. Activated Carbon from Bamboo - Technology Development towards Commercialization. Paper of Departement of Chiminal engineering of IIT. Mumbai, IN. s. p.
- Basso, M.; Cukierman, A. 2004. Conversión termoquímica de un precursor renovable en carbón activado. (en línea). Buenos Aires. AR. Consultado 22 mar. 2008. Disponible en <http://www.cricyt.edu.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2004/2004-t001-a001.pdf>
- Blanco, J.; Bonelli, P.; Cerrella E.; Cukierman, A. 1999. Activación química de bagazo de caña de azúcar para la obtención de carbones activados. (en línea). Buenos Aires, AR. Consultado 22 mar. 2008. Disponible en <http://www.cricyt.edu.ar/asades/modulos/averma/trabajos/1999/1999-t002-a011.pdf>

- Bambú en Chile - Boletín Informativo N° 4. 2003. Carbón de Bambú (en línea). s. l., CL. Consultado 22 mar. 2008. Disponible en <http://infomadera-ei.blogspot.pe/2012/06/bambu-en-chile-boletin-n-4.html>
- Carbotecnia. 2016. Encyclopedia (en línea). Consultado 2 nov. 2016. Disponible en: <https://www.carbotecnia.info/encyclopedia/que-es-el-carbon-activado/>
- Claudino, A. 2003. Preparacao de carvao ativado a partir de turfa e sua utilizacao na remocao de poluentes. Tesis Mestre Eng. Quimica, Florianapolis, BR. UFSC. 101 p.
- Consultora de aguas. 2009. ¿Qué es el carbón activado y para que se usa?. (en línea). s. l., AR Consultado 27 set. 2016. Disponible en: http://www.cdaguas.com.ar/pdf/aguas/15_Que_es_el_carbon_activ.pdf
- CORPEI. CBI. 2003. Bambú (Caña *Guadua angustifolia* “Caña brava”). (en línea). s. l., EC. Consultado 27 set. 2016 http://www.sigguadua.gov.co/sites/default/files/archivos/Perfil_de_bambu_en_Ecuador.pdf
- Desotec. 2016. carbon-activo. (en línea). Consultado 2 ene. 2016. Disponible en: <http://www.desotec.com/es/carbon-activo/aplicaciones-del-carbon-activo/>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, IT). 1983. Métodos simples para fabricar carbón vegetal. (en línea). Cómo la madera se transforma en carbón. Roma. IT. Consultado 22 mar. 2008. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/x5595s/X5595S00.htm>
- Forero, G.; Souza, H. 2007. La Guadua un Sistema innovador para la construcción de vivienda en Anapoima Cundinamarca. (en línea). Bogotá, CO. 61 p. Consultado 20 jul. 2014. Disponible en: <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/2177/T91.08%20F761g.pdf;jsessionid=1E27B09FD70E674B8F18220EEE6FAE6D?sequence=1>
- Fornwalt; Helbig; Scheffler. 1963. Activated Carbons for Liquid- Phase Adsorption. British Chemical Engineering. s.l., USA. 8 (8):546-550.
- Giraldo, E.; Sabogal, A. 2005. Una alternativa sostenible: la guadua. Técnicas de cultivo y manejo. Quindío, CO. 192 p.

- Gómez, A.; Rincón, S.; Klose, W. 2010. Carbón activado con cuescos de palma: Estudio de termogravimetría y estructura. (en línea). Kassel, DE. 123 p. Consultado 15 feb. 2012. Disponible en: <http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-820-0.volltext.frei.pdf>
- Gonzáles, E. 2002. Estudio de carbonización y sus productos de 02 especies de "paca" (*Guadua angustifolia* y *Guadua sarcocarpa*) provenientes de la zona de Iberia-Tahuamanu, Madre de Dios. Lima, PE, UNALM. p. 1-16.
- Gonzáles, E. 2005. Elaboración de una propuesta para el Aprovechamiento y la Transformación del Bambú en el Ámbito del PRODAPP (Puerto Inca-Oxapampa). Informe Final. Lima, PE. 122 p.
- Gonzáles, P. 2007. Características y Usos del Bambú. Acción Agraria. Lima, PE. 45 p.
- Google. 2016. Google Earth. Image © DigitalGlobe.
- Guerrero, M. 1987. Obtención de Carbón Activado a partir de Cáscara de café (*Coffea arabica*) por activación química. Tesis Ing. Químico. Lima, PE, UNMSM. 150 p.
- Hassler, J. 1973. Purification whit Activated Carbon. New York, USA. Chemical Publishing. 159 p.
- Hidalgo, O. 2003. Bamboo: the gift of the gods. 1 ed. Bogotá, CO. 553 p.
- INRENA (Instituto Nacional de Recursos Naturales, Perú). 1996. Guía explicativa del mapa forestal 1995. Lima, PE. 129 p.
- ITC (Centro de Comercio Internacional, Suiza). 1999-2015. Análisis e Investigación de Mercados. (en línea). Ginebra., SZ. Consultado 22 jun. 2014. Disponible en: <http://www.trademap.org/>
- Layseca, O. 2001. Obtención de Carbón Activado a partir de Aserrín de Tornillo (*Cedrelinga cateniformis* Ducke), mediante el Método Químico ($ZnCl_2$). Tesis Ing. Forestal. Lima, PE, UNALM. 70 p.
- Londoño, X; Camayo, G; Riaño, N; López, Y. 2002. Characterization of the anatomy of *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae) culms. Bamboo Science & Culture- The Journal of the American Bamboo Society. New York, USA. 16(1):18-31.

- Lozada, C. 2012. Determinación experimental de la durabilidad de tableros derivados del bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) mediante pruebas de envejecimiento aceleradas. Tesis Ing. Químico. Guayaquil, EC. UG 130 p.
- Luteral, E. 1940. Carbones Activos. Buenos Aires, AR. 173 p.
- Mantell, C. 1951. Adsorption. 2 da Edición. Mc Graw - Hill Book Company I.N.C. London. 63 p.
- Manual del Carbón Activo. 2009. Sevilla, ES, US. 89 p.
- Martín, J. 1990. Adsorción física de gases y vapores por carbones. Alicante. ES. Espagrafic. 80 p.
- Meggs, F. 1968. Manufactured Carbon. Active carbon. Pergamon Press. London. s. p.
- Mercedes, J. 2006. Guía Técnica Cultivo de Bambú. Santo Domingo, R.D. CEDAF. 37 p.
- Menéndez, J. 2008. Residuos de biomasa para la producción de carbones activos y otros materiales de interés tecnológico. Oviedo, ES. UNIOVI. 10 p.
- Morais, F.; Pereira da Silva, F.; Carvalho, M.; Gualberto, A. 2003. Desenvolvimento e criação de uma unidade produtiva de carvão ativado (en línea). Ouro Preto, Minas Gerais, BR. Consultado 22 mar. 2015. Disponible en: http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2003_TR0502_0601.pdf
- MINAG (Ministerio de Agricultura, Perú). 2008. Plan Nacional de Promoción del Bambú 2008 – 2020. Lima, PE. 33 p.
- MINAG (Ministerio de Agricultura, Perú). 2011. Bambú: “Biología, cultivo, manejo y usos en el Perú”. Lima, PE. 68 p.
- Morelli, M. 2000. Estudio preliminar para la instalación de una planta de carbón activado para la minería a partir de la cáscara de café. Tesis: Ing. Industrial. Lima, PE, UL. s. p.
- Navarrete, L.; Giraldo, L.; Baquero, M.; Moreno, J. 2005. Carbón activado: efecto del lavado con ácido sulfúrico del precursor lignocelulósico, cuesco de palma africana, sobre los procesos de carbonización y activación. Bogotá, CO. Revista Colombiana de Química. Vol. 34 (1):67-78.

- NMX (Norma Mexicana). 1977. Determinación de la adsorción de Azul de metileno por muestras de carbones activados empleados en la refinación de azúcar. NMX-F-301-1977. s. l., MX. 4 p.
- _____. 1981. Alimentos para uso humano. Azúcar. Determinación de la calidad de carbones activados empleados en la refinación de azúcar. NMX-F-295-1981. s. l., MX. 4 p.
- NTP (Norma Técnica Peruana). 1982. Carbón activado usado en la industria azucarera y otros productos edulcorantes. NTP 207.024-1982. Lima, PE. 3 p.
- Olivier, J. 2008. Gramíneas (Poaceae) Bambusiformes del Río de Los Amigos. Madre de Dios, PE. Revista Peruana de Biología. 15 (1): 121–126.
- Pérez, C. 2014. Caracterización genética de relictos de *Guadua angustifolia*, un ecosistema estratégico de la ecorregión valle del Cauca Mediante STR's. Tesis D. Sevilla, ES. UPO. 324 p.
- Prías, J., Rojas, C., Echeverry, N. y Ariza, H. 2011. Identificación de las variables óptimas para la obtención de carbón activado partir del precursor *Guadua angustifolia* Kunth. Bogotá, CO. Revista académica colombiana de ciencias 35 (135): 157-166.
- Rozas, P. 2008. Estudio de adsorción para Cr (VI) utilizando chacay (*Ulex europaeus*) como carbón activado recubierto con quitosan. Seminario Ing. en Medio Ambiente y Manejo Costero. Puerto Montt, CL, ULAGOS. 79 p.
- Salas, E. 2006. Actualidad y Futuro de la arquitectura de bambú en Colombia. Simón Vélez: Símbolo y búsqueda de lo primitivo. Tesis Doc. Barcelona, ES, UPC. 410 p.
- Sax, N. 1957. Dangerous Properties of Industrial Materials. 5° ed. Reinhold, New York, USA. 1494 p.
- SUNAT (Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria, Perú). 1997-2016. Lima, PE. Exportaciones e Importaciones. (en línea). Consultado 22 mar. 2015. Disponible en: <http://www.sunat.gob.pe/operatividadaduanera/index.html>
- Schanz, J.; Parry, R. 1962. The activated Carbon Industry. Industrial and Engineering Chemistry. Washington, USA. 54 (12): 24-28.

- Smisek, M.; Cerny, S. 1970. Active Carbon: Manufacture, properties and applications. American-Elsevier Publishing Co. New York, USA. 479 p.
- Takahashi, J.; Ascencios, D. 2004. Inventario de Bambú en el Perú. Informe Final. Lima, PE, GTZ. Lima AB Sustenta S.A.C. - GTZ 2004 – 14. 62 p. GTZ Contrato 01.2459.4-001.00/Pi-030/03.
- Teruya, R. 2003. Influencia de tres Variables en la Obtención de Carbón Activado de Residuos de Madera de 3 Especies Comerciales. (Cedrelinga cateniformis Ducke, Brosimum alicastrum y Swietenia macropylla King). Tesis Ing. Forestal. Lima, PE, UNALM. 120 p.
- Valdivieso, N. 2012. Obtención de carbón activado por método físico a partir de semillas de “Aguaje *Mauritia flexuosa* procedente de la región Loreto. Tesis Ing. Forestal. Lima, PE, UNALM. 87 p.
- Varriano, N.; Gil, M.; Cozzarín, R.; Pereyra, A.; Balasini, J.; Alberino, J.; García, S.; Pucacco, S. 2013. Producción sustentable de carbón activado a partir de caña de bambú (en línea). Buenos Aires, AR. Consultado 22 mar. 2015. Disponible en: http://www.edutecne.utn.edu.ar/coini_2013/trabajos/COE01_TC.pdf
- Velásquez, 2010. Optimización de la producción de carbón activado a partir de Bambú. Revista Mexicana de Ingeniería Química. Orizaba, Veracruz., MX. 9(3): 359-366.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1 ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL RENDIMIENTO.

Análisis de Varianza para Rendimiento
Variable Dependiente: Rendimiento

Fuente	gl	Suma de Cuadrados Ajust	CM Ajustados	F	P
Temperatura	1	10,696	10,696	10,25	0,015
Tiempo	1	8,670	8,670	8,31	0,024
Concentración	1	8,285	8,285	7,94	0,026
TipoCarbón	1	176,195	176,195	168,92	0,000
Temperatura*Tiempo	1	0,557	0,557	0,53	0,489
Temperatura*Concentración	1	0,142	0,142	0,14	0,723
Tiempo*Concentración	1	0,655	0,655	0,63	0,454
Temperatura*Tiempo*Concentración	1	0,388	0,388	0,37	0,561
Error	7	7,301	1,043		
Total	15	212,889			

S = 1,02130 R-cuad. = 96,57% R-cuad.(ajustado) = 92,65%

ANEXO 2
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA DENSIDAD APARENTE.

Análisis de Varianza para Densidad Aparente
Variable Dependiente: Densidad Aparente

Fuente	gl	Suma de Cuadrados Ajust	CM Ajustados	F	P
Temperatura	1	0,000795	0,000795	0,65	0,445
Tiempo	1	0,000221	0,000221	0,18	0,682
Concentración	1	0,021633	0,021633	17,82	0,004
TipoCarbón	1	0,102921	0,102921	84,80	0,000
Temperatura*Tiempo	1	0,000698	0,000698	0,58	0,473
Temperatura*Concentración	1	0,000904	0,000904	0,74	0,417
Tiempo*Concentración	1	0,000001	0,000001	0,00	0,981
Temperatura*Tiempo*Concentración	1	0,000788	0,000788	0,65	0,447
Error	7	0,008496	0,008496		
Total	15	0,136457			

S = 0,0348386 R-cuad. = 93,77% R-cuad.(ajustado) = 86,66%

ANEXO 3
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA HUMEDAD.

Análisis de Varianza para Humedad
Variable Dependiente: Humedad

Fuente	gl	Suma de Cuadrados Ajust	CM Ajustados	F	P
Temperatura	1	41,831	41,831	5,64	0,049
Tiempo	1	2,879	2,879	0,39	0,553
Concentración	1	35,731	35,731	4,82	0,064
TipoCarbón	1	52,605	52,605	7,09	0,032
Temperatura*Tiempo	1	6,455	6,455	0,87	0,382
Temperatura*Concentración	1	26,875	26,875	3,62	0,099
Tiempo*Concentración	1	0,164	0,164	0,02	0,886
Temperatura*Tiempo*Concentración	1	1,544	1,544	0,21	0,662
Error	7	51,921	51,921		
Total	15	220,005			

S = 2,72346 R-cuad. = 76,40% R-cuad.(ajustado) = 49,43%

ANEXO 4
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL MATERIAL VOLÁTIL.

Análisis de Varianza para Mat.Volátil
Variable Dependiente: Mat.Volátil

Fuente	gl	Suma de Cuadrados Ajust	CM Ajustados	F	P
Temperatura	1	41,096	41,096	22,21	0,002
Tiempo	1	0,143	0,143	0,08	0,789
Concentración	1	47,820	47,820	25,85	0,001
TipoCarbón	1	3,785	3,785	2,05	0,196
Temperatura*Tiempo	1	1,575	1,575	0,85	0,387
Temperatura*Concentración	1	1,680	1,680	0,91	0,372
Tiempo*Concentración	1	2,080	2,080	1,12	0,324
Temperatura*Tiempo*Concentración	1	3,159	3,159	1,71	0,233
Error	7	12,950	12,950		
Total	15	114,287			

S = 1,36016 R-cuad. = 88,67% R-cuad.(ajustado) = 75,72%

ANEXO 5
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA CENIZAS.

Análisis de Varianza para Cenizas
Variable Dependiente: Contenido Cenizas

Fuente	gl	Suma de Cuadrados Ajust	CM Ajustados	F	P
Temperatura	1	57,73	57,73	5,76	0,047
Tiempo	1	6,03	6,03	0,60	0,463
Concentración	1	22,91	22,91	2,29	0,174
TipoCarbón	1	233,93	233,93	23,35	0,002
Temperatura*Tiempo	1	8,16	8,16	0,81	0,397
Temperatura*Concentración	1	21,17	21,17	2,11	0,189
Tiempo*Concentración	1	0,33	0,33	0,03	0,860
Temperatura*Tiempo*Concentración	1	4,00	4,00	0,40	0,548
Error	7	70,13	70,13		
Total	15	424,38			

S = 3,16511 R-cuad. = 83,48% R-cuad.(ajustado) = 64,59%

ANEXO 6
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL MATERIAL VOLÁTIL.

Análisis de Varianza para Carbono Fijo
Variable Dependiente: Carbono Fijo

Fuente	gl	Suma de Cuadrados Ajust	CM Ajustados	F	P
Temperatura	1	1,409	1,409	0,17	0,696
Tiempo	1	8,030	8,030	0,95	0,363
Concentración	1	4,533	4,533	0,53	0,488
TipoCarbón	1	297,218	297,218	35,04	0,001
Temperatura*Tiempo	1	2,564	2,564	0,30	0,600
Temperatura*Concentración	1	10,925	10,925	1,29	0,294
Tiempo*Concentración	1	0,747	0,747	0,09	0,775
Temperatura*Tiempo*Concentración	1	0,049	0,049	0,01	0,942
Error	7	59,369	59,369		
Total	15	384,844			

S = 2,91227 R-cuad. = 84,57% R-cuad.(ajustado) = 66,94%

ANEXO 7
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA ABSORCIÓN DE AZUL DE METILENO.

Análisis de Varianza para Abs.Azul.Metileno
Variable Dependiente: Abs.Azul.Metileno

Fuente	gl	Suma de Cuadrados Ajust	CM Ajustados	F	P
Temperatura	1	190,42	190,42	5,84	0,046
Tiempo	1	92,96	92,96	2,85	0,135
Concentración	1	3 214,45	3214,45	98,55	0,000
TipoCarbón	1	641,13	641,13	19,66	0,003
Temperatura*Tiempo	1	25,50	25,50	0,78	0,406
Temperatura*Concentración	1	190,42	190,42	5,84	0,046
Tiempo*Concentración	1	27,10	27,10	0,83	0,392
Temperatura*Tiempo*Concentración	1	1,80	1,80	0,06	0,821
Error	7	228,31	228,31		
Total	15	4 612,10	4 612,10		

S = 5,71104 R-cuad. = 95,05% R-cuad.(ajustado) = 89,39%

ANEXO 8
ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LECTURA DE PH.

Análisis de Varianza para Lectura pH
Variable Dependiente: Lectura pH

Fuente	gl	Suma de Cuadrados Ajust	CM Ajustados	F	P
Temperatura	1	0,028266	0,028266	7,80	0,027
Tiempo	1	0,076660	0,076660	21,16	0,002
Concentración	1	0,123523	0,123523	34,09	0,001
TipoCarbón	1	0,002082	0,002082	0,57	0,473
Temperatura*Tiempo	1	0,000032	0,000032	0,01	0,928
Temperatura*Concentración	1	0,035234	0,035234	9,72	0,017
Tiempo*Concentración	1	0,020724	0,020724	5,72	0,048
Temperatura*Tiempo*Concentración	1	0,002521	0,002521	0,02521	0,432
Error	7	0,025363	0,025363	0,70	
Total	15	0,314404			

S = 0,0601939 R-cuad. = 91,93% R-cuad.(ajustado) = 82,71%

ANEXO 9
NMX-F-295-1981. ALIMENTOS PARA USO HUMANO. AZÚCAR.
DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DE CARBONES ACTIVADOS
EMPLEADOS EN LA REFINACIÓN DE AZÚCAR. FOODS FOR HUMAN USE.
NORMAS MEXICANAS. DIRECCIÓN GENERAL DE NORMAS. PREFACIO.

En la elaboración de la presente Norma, participaron los siguientes Organismos:

Subdirección de la Industria Azucarera
Secretaría de Hacienda y Crédito Público
Laboratorio Central
Dirección de Servicios al Contribuyente
Secretaría de Salubridad y Asistencia
Dirección General de Control de Alimentos, Bebidas y Medicamentos.
Clarifiltrantes Mexicanos, S.A.
Polifos, S.A. de C.V.
Calgon-Proveedores Técnicos, S.A. de C.V.

1. OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACION

Esta Norma Mexicana establece las especificaciones que debe cumplir los carbones Activados de cualquier origen empleados en la refinación de azúcar.

2. REFERENCIAS

Esta Norma se complementa con las siguientes Normas Mexicanas vigentes:

NMX-F-282. Determinación de la densidad aparente en muestras de carbones activados empleados en la refinación de azúcar.

NMX-F-283. Determinación de pH en muestras de carbones activados empleados en la refinación de azúcar.

NMX-F-284. Determinación del contenido total de cenizas en muestras de carbones activados empleados en la refinación de azúcar.

NMX-F-287. Determinación de la granulometría en muestras de carbones activados empleados en la refinación de azúcar.

NMX-F-299. Determinación del índice de decoloración de soluciones de azúcar crudo en muestras de carbones activados empleados en la refinación de azúcar.

NMX-F-296. Determinación del número de yodo en muestras de carbones activados empleados en la refinación de azúcar.

NMX-F-301. Determinación de la adsorción de azul de metileno en muestras de carbones activados empleados en la refinación de azúcar.

RECOPIADO POR:

EL PROGRAMA UNIVERSITARIO DE ALIMENTOS

3. DEFINICIONES

Para los efectos de esta Norma se establecen las siguientes definiciones:

3.1 Calidad: Es el conjunto de especificaciones que acompañan a un producto

3.2 Carbón activado: Tipo de carbón que se prepara por distintos métodos, los cuales le imparten un aumento de porosidad y por consecuencia mayor poder de adsorción derivado de su superficie de contacto y de la interacción entre adsorbente y adsorbato.

4. FUNDAMENTO

Se basa en el establecimiento de los límites de los valores de las especificaciones de los carbones activados, necesarios para producir un licor de las especificaciones requeridas.

5. CLASIFICACION

El producto objeto de esta Norma se clasifica de acuerdo al tamaño de sus partículas en dos tipos y un solo grado de calidad.

Tipo I. Carbones activados pulverizados

Tipo II. Carbones activados granulares

6. ESPECIFICACIONES

Los carbones activados empleados en la refinación de azúcar en sus dos tipos y un solo grado de calidad deben cumplir con las siguientes especificaciones:

6.1 Carbones activados pulverizados

6.1.1 Apariencia Polvo negro

6.1.2 pH 6.0 a 8.5

6.1.3 Contenido de humedad % máximo 12,0 al envasar

6.1.4 Densidad aparente g/cm^3 máximo 0,4

6.1.5 Contenido total de cenizas % máximo 12,0

6.1.6 Tamaño de partículas % mínimo 95,0 NOM-80 M (200 U.S.)

6.2 Carbones activados granulares

6.2.1 pH 5,5 a 8,0

6.2.2 Contenido de humedad % 12,0 al envasar.

6.2.3 Densidad aparente g/cm^3 máximo 0,46

6.2.4 Contenido total de cenizas % máximo 12,5