

ESTANDARIZACIÓN DE PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CARBÓN
ACTIVADO POR ACTIVACIÓN FÍSICA A PARTIR DE CUESCO DE PALMA A
ESCALA INDUSTRIAL

BRANDA LINDSAY AGUDELO ALVAREZ

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2017

ESTANDARIZACIÓN DE PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CARBÓN
ACTIVADO POR ACTIVACIÓN FÍSICA A PARTIR DE CUESCO DE PALMA A
ESCALA INDUSTRIAL

BRANDA LINDSAY AGUDELO ALVAREZ

Proyecto integral de grado para el título de
INGENIERA QUIMICA

Director
PEDRO OSWALDO GUEVARA
Ingeniero Químico

Orientador
EDGAR FERNANDO MORENO TORRES
Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUIMICA
BOGOTÁ D.C.
2017

Nota de aceptación

Ing. Edgar Fernando Moreno

Ing. Alexander López

Ing. Juan Camilo Cely

Bogotá D.C., 30 de junio de 2017

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA

Vicerrectora Académica de Posgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA

Decano General de Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director Departamento de Ingeniería Química

Ing. LEONARDO DE JESUS HERRERA G.

Las Directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por la vida, y poder culminar satisfactoriamente este trabajo.

A mi familia mi Papá, Mamá y hermana quienes son todo para mí, y me han apoyado incondicionalmente durante mi vida y mi carrera, sé el esfuerzo tan grande que ellos han hecho siempre para poder llegar hasta acá.

A Felipe por su apoyo, paciencia y sus palabras de ánimo cada que era necesario para llegar a la meta.

Esto es por ustedes y para ustedes, los amo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente a:

La empresa Industrias Tecsol Ltda. por permitir el uso de sus equipos para el desarrollo del proyecto y el apoyo incondicional que prestó su grupo de trabajo en las instalaciones del Carvajal y en Soacha.

Al Ingeniero Pedro Guevara por sus importantes aportes y colaboración durante la ejecución del trabajo. Además de guiar y dirigir el desarrollo del proyecto de grado.

Al Profesor José Rincón por su aporte para el proyecto con sus valiosos conocimientos y consejos durante la ejecución de este.

Al Ingeniero Fernando Moreno por su tiempo y asesorías para terminar a cabalidad el trabajo, por apoyarme y aconsejarme siempre que se presentaron dificultades.

Además, agradezco a todas las personas que de una u otra forma apoyaron para culminar este trabajo con éxito.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	21
OBJETIVOS	23
1. MARCO TEORICO	24
1.1 CARBÓN ACTIVADO	24
1.2 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL CARBÓN ACTIVADO	25
1.2.1 Porosidad.	25
1.2.2 Área superficial.	26
1.2.3 Composición química.	26
1.2.4 Estructura física	27
1.3 MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS PARA LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO	27
1.4 CUESCO DE PALMA AFRICANA PARA LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO	28
1.5 PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO	31
1.5.1 Recepción y acondicionamiento de materia prima.	32
1.5.2 Carbonización.	32
1.5.3 Activación.	33
1.6 TIPOS DE CARBÓN ACTIVADO	34
1.7 USOS DEL CARBÓN ACTIVADO	35
2. CARACTERIZACIÓN DEL CUESCO DE PALMA PARA LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO	37
2.1 ANÁLISIS ELEMENTAL DEL CUESCO DE PALMA	37
2.2 ANÁLISIS PRÓXIMO DEL CUESCO DE PALMA	38
2.2.1 Humedad.	41
2.2.2 Material volátil.	42
2.2.3 Cenizas.	43
2.2.4 Carbono fijo.	44
3. EVALUACION DE LA TEMPERATURA Y TIEMPO DE RESIDENCIA EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO	46
3.1 PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO EN INDUSTRIAS TECSOL Ltda.	46
3.1.1 Diseño del proceso.	47
3.1.2 Equipos.	50
3.2 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y EL TIEMPO DE RESIDENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO	51
3.2.1 Fase de Carbonización.	53
3.2.2 Fase de Activación	53

3.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DEL TIEMPO DE RESIDENCIA Y LA TEMPERATURA	53
3.3.1 Experimentación en la carbonización.	53
3.3.2 Experimentación en la Activación.	58
4. DETERMINAR LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CUESCO DE PALMA	64
4.1 EFICIENCIA DE LA CARBONIZACION EN LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO	64
4.1.1 Balance de masa de la carbonización	64
4.1.2 Balance de energía de la carbonización.	67
4.2 EFICIENCIA DE LA ACTIVACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO	70
4.2.1 Balance de masa de la activación.	70
4.2.2 Balance de energía de la activación	72
5. CARACTERIZAR EL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO	76
5.1 ÍNDICE DE YODO	76
5.2 ÍNDICE DE AZUL DE METILENO	79
5.3 DENSIDAD APARENTE	82
5.4 ISOTERMA DE FREUNDLICH	82
5.5 ISOTERMA DE TIEMPO DE CONTACTO	85
6. CONCLUSIONES	88
7. RECOMENDACIONES	89
BIBLIOGRAFÍA	90
ANEXOS	94

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. (a) Arreglo estructural de las capas de grafito, (b) Estructura propuesta de las capas de carbón activado, unidades en Å	27
Figura 2. Cuesco de palma africana	29
Figura 3. Diagrama del proceso de extracción del aceite de palma. Humedad en base seca.	30
Figura 4. Diagrama de proceso de producción de CA	31
Figura 5. Descomposición térmica en la carbonización	32
Figura 6. Tipos de carbón activado.	35
Figura 7. Equipo de Análisis TGA de Industrias Tecsol Ltda. (a) Horno de calentamiento. (b) Balanza. (c) Termocupla.	39
Figura 8. Muestras de cuesco de palma tamizado	40
Figura 9. Muestra de cuesco tamizado (<250 µm)	40
Figura 10. Diseño de proceso de producción de CA	48
Figura 11. Carbonización de cuesco de palma a diferentes temperaturas	51
Figura 12. Influencia de la Temperatura y Tiempo de Residencia en rendimiento y características del producto	52
Figura 13. Diagrama de balance de masa en el horno de Carbonización.	65
Figura 14. Balance de energía horno de carbonización	68
Figura 15. Balance de masa horno de activación.	71
Figura 16. Filtrado de las muestras representativas de solución de yodo más CA	77
Figura 17. Titulación de la solución remanente del filtrado con tiosulfato de sodio. Para cada titulación se utilizaron de 2 a 5 mL de tiosulfato.	78
Figura 18. Muestras diluidas de azul de metileno	82

Figura 19. Muestras filtradas de azul de metileno 83

Figura 20. Muestras filtradas de isoterma de tiempo de contacto. 85

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Clasificación IUPAC de poros según el tamaño	26
Tabla 2. Principales materias primas y tecnologías con las que se fabrican carbones activados y valores típicos de las propiedades obtenidas	28
Tabla 3. Principales componentes del cuesco, tusa y fibra de la palma africana	31
Tabla 4. Tipos de reacciones de la gasificación	34
Tabla 5. Análisis elemental del cuesco de palma (Ensayo 1)	37
Tabla 6. Análisis elemental del cuesco de palma (Ensayo 2)	38
Tabla 7. Composición elemental promedio del cuesco de palma	38
Tabla 8. Mallas utilizadas en análisis próximo	39
Tabla 9. Análisis próximos del cuesco de palma	44
Tabla 10. Porcentaje carbono fijo del carbonizado (%CF)	55
Tabla 11. Rendimiento másico de la carbonización de cuesco de palma	58
Tabla 12. Índice de yodo para las muestras de carbón activado	60
Tabla 13. Rendimiento másico de la activación calculados a partir de la masa de carbonizado alimentada al horno con respecto a la masa de carbón activado producido	61
Tabla 14. Condiciones de operación para la carbonización	62
Tabla 15. Condiciones de operación para la activación	62
Tabla 16. Composición gases volátiles	66
Tabla 17. Composición de alquitranes	66
Tabla 18. Balance de masa en el horno de carbonización	67
Tabla 19. Calor específico y capacidad calorífica de las corrientes del horno de carbonización	69

Tabla 20. Temperaturas y flujos máxicos de las corrientes del horno de carbonización	69
Tabla 21. Balance de energía para el horno de carbonización.	70
Tabla 22. Balance de masa horno de activación.	72
Tabla 23. Determinación de Q para cada corriente en el horno de activación	74
Tabla 24. Balance de energía para el horno de activación	74
Tabla 25. Resultados de índices de yodo para las muestras de Carbón activado.	79
Tabla 26. Índice de azul de metileno	80
Tabla 27. Diluciones y absorbancia de las muestras	83
Tabla 28. Resultados isoterma Freundlich	84
Tabla 29. Resultados de isoterma de tiempo de contacto	86

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfica 1. Análisis de TGA para el cuesco de palma	41
Grafica 2. Desvolatilización del cuesco en el equipo TGA	42
Grafica 4. TGA muestras carbonizadas a 400°C.	56
Grafica 5. TGA muestras carbonizadas a 500°C	56
Grafica 6. TGA muestras carbonizadas a 600°C	57
Grafica 9. Determinación de índice azul de metileno.	80
Grafica 10. Curva absorbancia de las muestras diluidas.	84
Grafica 11. Isotherma de Freundlich.	85
Grafica 12. Isotherma de tiempo de contacto.	86

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Porcentaje de humedad	42
Ecuación 2. Porcentaje materia volátil	43
Ecuación 3. Porcentaje contenido de cenizas	43
Ecuación 4. Porcentaje carbono fijo	44
Ecuación 5. Temperatura en el análisis TGA	55
Ecuación 6. Balance de masa horno carbonización.	65
Ecuación 7. Balance de energía horno de carbonización	68
Ecuación 8. Flujo de calor.	68
Ecuación 9. Balance de masa horno de activación.	71
Ecuación 10. Flujo de calor	73
Ecuación 11. Balance de energía en el horno de activación	73
Ecuación 12. Cantidad en mg de yodo adsorbidos por gramo de CA	76
Ecuación 13. Normalidad residual del filtrado.	77
Ecuación 14. Índice de yodo de la muestra de CA.	77
Ecuación 15. Densidad aparente.	82

GLOSARIO

ACTIVACION FÍSICA: proceso en el que el carbonizado se somete a corrientes de vapor con elevadas temperaturas, para extraer átomos de carbono de la estructura y favorecer la formación de poros en el material carbonoso.

ADSORCIÓN: fenómeno en el que un sólido capta y acumula en su superficie sustancias solubles.

CARBÓN ACTIVADO: estructura carbonosa preparada sintéticamente, que posee una estructura porosa muy desarrollada y con alta área superficial lo que le permite ser un buen absorbente.

CARBONIZACIÓN: proceso de pirolisis que genera un producto carbonoso por descomposición térmica en ausencia de oxígeno.

CARBONO FIJO: es el carbono puro presente en la estructura de la muestra analizada.

CONTENIDO DE CENIZAS: producto de la combustión de un material con contenido orgánico combustible e inorgánico no combustible. Es la cantidad de materia inorgánica resultante.

CUESCO DE PALMA: residuo agroindustrial generado luego de la extracción del aceite de la almendra de palma africana. Representa el 6-7% de los racimos de fruta fresca antes de ser procesada.

DIÁMETRO DE PORO: expresa el tamaño de los poros u orificios presentes en la estructura de un material. Generalmente se expresan en nanómetros o micrómetros.

HUMEDAD: cantidad de agua o líquido que está presente en la superficie o interior de un material.

ÍNDICE DE YODO: define la cantidad de yodo (mg) adsorbido por un gramo de CA en polvo.

ÍNDICE DE AZUL DE METILENO: define el área superficial del carbón activado como el número de mililitros de una solución estándar decolorados por 0.1 g de CA

MATERIAL VOLÁTIL: tipo de material que, por sus propiedades o condiciones físicas tiene la facilidad de dispersarse en el aire.

PIRÓLISIS: es la degradación térmica o desvolatilización de la biomasa en ausencia de oxígeno.

POROSIDAD: representa el tamaño y número de poros presentes en la estructura sólida de un material.

TIEMPO DE RESIDENCIA: cantidad de tiempo que puede pasar un material dentro de un reactor.

ABREVIATURAS

“	Pulgadas
%	Porcentaje
°	Grados
°C	Grados centígrados
AM	Azul de metileno
ASTM	American Society of Testing Materials
CA	Carbón activado
CF	Carbono fijo
CHNS	Carbono, Hidrogeno, Nitrógeno, Azufre
CO₂	Dióxido de carbono
C_p	Calor específico [<i>kcal/kg°C</i>]
H	Humedad
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
kcal	Kilocalorías
Kg	Kilogramos
<i>m</i>	Flujo másico [<i>kg/h</i>]
M	Metros
mL	Mililitros
min	Minutos
MV	Materia volátil
Nm	Nanómetro
NO_x	Óxidos de nitrógeno
P_c	Poder calorífico [<i>kcal/kg</i>]
RFF	Racimos de fruta fresca
RFV	Racimos vacíos
SO_x	Óxidos de azufre
TGA	Termogravimétrico

RESUMEN

El carbón activado es un material carbonoso producto de la descomposición térmica de materiales con elevados contenidos de carbono en su estructura funciona como adsorbente y presenta un diverso campo de aplicación en el sector industrial implementado para: tratamientos de aguas, recuperación de solventes, industria azucarera, minería, entre otros. Para el desarrollo de este proyecto se va a producir carbón activado a nivel industrial a partir de cuesco de palma, considerando que es un material con características óptimas para ser utilizado como precursor del carbón activado. Se tuvo en cuenta la abundancia del residuo que se genera en el sector palmero, facilitando su obtención y propagando un manejo adecuado a este, teniendo en cuenta los volúmenes de residuos que se producen, ocasionan algunos problemas ambientales y sociales. Durante el proceso de producción del carbón activado, en la carbonización y activación, se van a evaluar la temperatura y el tiempo de residencia como variables críticas del proceso, para establecer su influencia en las propiedades del producto obtenido. Además, se establecen las condiciones de operación óptimas para la obtención de un carbón activado con características uniformes, ofreciendo un producto que compita en el mercado con los Carbones Activados proveniente de otras industrias.

PALABRAS CLAVES: Cuesco de palma, Carbón activado, Carbonización, Porosidad, Activación, Área superficial.

ABSTRACT

Activated carbon is a carbonaceous material product of thermal decomposition of materials with a high carbon content in its structure, it functions as an adsorbent and presents a different field of application in the industrial sector, implemented for: water treatment, recovery of solvents, sugar industry, mining, and others. For the development of this project is a carbon produced at an industrial level from the palm shell, considering that it is a material with optimal characteristics to be used as a precursor to activated carbon. It was taken into account the abundance of the waste generated in the palm sector, supply its collection and propagation in an appropriate management, taking into account the volumes of waste produced, cause some environmental and social problems. During the process of production of activated carbon, in the carbonization and activation, the temperature and time of residence will be evaluated as critical variables of the process, to establish their influence on the properties of the product obtained. In addition, it establishes the optimal operating conditions for obtaining an activated carbon with uniform characteristics, offering a product that compete in the market with activated carbon from other industries.

KEY WORDS: Palm Shell, Activated carbon, Carbonization, Porosity, Activation, Surface area.

INTRODUCCIÓN

El uso de los residuos agroindustriales comprende una alternativa viable para la generación de otros productos de mayor valor agregado teniendo en cuenta sus componentes, además, disminuyendo el impacto ambiental que genera la disposición y manejo de estos. Hoy en día Colombia cuenta con grandes extensiones de tierra cultivadas con palma africana para la producción de: aceites de cocina, grasas especiales, margarinas, jabones, entre otros productos del sector industrial. “Colombia, con 1,70 %, es el cuarto productor de aceite de palma en el mundo y el primero en América. Lo siguen Ecuador y Honduras en la región, y todos están lejos aún de los 10,5 millones de hectáreas que tiene sembradas Indonesia, que junto con Malasia cubre el 85 % del mercado.”¹

El carbón activado es un material carbonoso con óptimas capacidades de adsorción, que se puede obtener a partir de la descomposición térmica de residuos agroindustriales. Actualmente, este producto es muy reconocido en el mercado mundial por sus aplicaciones para la limpieza de flujos gaseosos o líquidos dentro del campo de la medicina, la industria biofarmacéutica, medio ambiente, entre otros. “Con cerca de 300 mil toneladas anuales de cuesco, envoltura de la almendra del fruto de la palma, la palmicultura es uno de los sectores agrícolas que más desechos produce en el país”², es factible la producción de carbón activado a partir de residuos de cuesco de palma para su aprovechamiento por su abundancia y sus características físicas y químicas adecuadas para la generación de un producto provechoso que ofrece un cuantioso campo de aplicación para el sector industrial.

Industrias Tecsol Ltda. es una empresa dedicada a la investigación y desarrollo de nuevos productos y tecnologías más limpias. En los últimos años la empresa ha desarrollado investigaciones sobre la activación de carbones, obtención de carbón activado a partir de diferentes precursores, caracterización de las materias primas y producto. Es importante la estandarización de la producción de carbón activado en proceso continuo pues, con el desarrollo de este proyecto se fijan las condiciones de operación para la obtención de un carbón activado a partir de cuesco de palma con características uniformes, mediante la evaluación de variables críticas del proceso como la temperatura y el tiempo de residencia, y su relación e influencia con la calidad del carbonizado y el producto final. Además, establecer una producción continua a escala industrial, que le permitirá a la empresa la

¹ ALVAREZ, Carlos. Colombia apuesta al millón de hectáreas de palma de aceite. En: Portafolio [En línea] (27 septiembre de 2015) disponible en <www.portafolio.co/negocios/empresas/colombia-apuesta-millon-hectareas-palma-aceite-39680> [citado el 16 de diciembre de 2016]

² MENDOZA, Santiago. Residuos de palma africana purifican agua y aire. En: UN Periódico [En línea] (10 de mayo de 2014) disponible en <http://www.unperiodico.unal.edu.co/vpp/article/residuos-de-palma-africana-purifican-agua-y-aire.html?TB_iframe=true&height=600&width=690> [citado el 16 de diciembre de 2016]

comercialización de un producto de calidad que compita en el mercado con los carbones activados que provienen de otras empresas.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Estandarizar el proceso de la producción de carbón activado con activación física a partir de cuesco de palma a escala industrial.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el cuesco de palma que se va a utilizar para la producción de carbón activado.
- Evaluar la temperatura y el tiempo de residencia en el proceso de producción del carbón activado a partir del cuesco de palma.
- Determinar la eficiencia del proceso de producción del carbón activado a partir de cuesco de palma.
- Caracterizar el carbón activado obtenido.

1. MARCO TEORICO

El carbón activado es un material carbonoso con optimas capacidades de adsorción que se puede obtener a partir de la descomposición térmica de residuos agroindustriales, para el desarrollo de este proyecto se va a producir carbón activado a nivel industrial a partir de cuesco de palma teniendo en cuenta la abundancia del residuo que se genera en el sector palmero, facilitando su obtención y propagando un manejo adecuado a este. En este capítulo se expone un breve contenido de los temas relacionados con el carbón activado que se abordan a lo largo del desarrollo del proyecto como la definición, las propiedades, aplicaciones industriales, proceso de producción, clasificación y además una descripción preliminar del cuesco de palma como precursor del carbón activado.

1.1 CARBÓN ACTIVADO

El carbón activado es un material carbonoso, microcristalino preparado a partir de compuestos carbonosos tales como, madera, turba, petróleo, carbón mineral, residuos agroindustriales, entre otros. Las materias primas deben contener elevado porcentaje de carbono en su estructura química, bajo contenido de cenizas y productividad en masa luego de la carbonización. El carbón activado posee una estructura porosa bastante desarrollada y una alta área superficial que le permite ser un buen adsorbente, ya que las moléculas que se quieren adsorber son acumuladas dentro de los poros. El proceso de adsorción del carbón activado, consiste en la unión de una sustancia gaseosa o líquida en la superficie de una matriz sólida, como consecuencia de fuerzas de Van der Waals (adsorción física) o enlaces químicos (adsorción química).

Las propiedades adsorbentes del carbón activado de compuestos químicos, depende del ordenamiento interno y tamaño de los poros, lo cual origina un área superficial interna activa para capturar especies moleculares. Diferencias en la distribución del tamaño de poros afecta la capacidad de adsorción de moléculas de diferentes tamaños y formas, y por lo tanto, es el criterio más utilizado para seleccionar la aplicación deseada, “los microporos le confieren la elevada superficie y capacidad de retención, mientras que los mesoporos y los macroporos son necesarios para retener moléculas de gran tamaño, como pueden ser colorantes o coloides, y favorecer el acceso y la rápida difusión de las moléculas a la superficie interna del sólido.”³ El mecanismo de retención de moléculas sobre la superficie de carbón activado se lleva a cabo por medio de la adsorción física y como tal es reversible. La teoría de adsorción señala que cambiando las condiciones en las que se encuentra el carbón, se podrá lograr la desorción o desprendimiento de los adsorbatos retenidos, dejando libre su superficie. sin embargo, en el desarrollo de

³AGUAPEDIA. Trabajo de grado Máster en Ingeniería del Agua. Manual del Carbón Activado. España: Escuela Politécnica Superior Universidad de Sevilla.

este trabajo los mecanismos de recuperación del carbón activado no se tendrán en cuenta.

1.2 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL CARBÓN ACTIVADO

El carbón activado tiene como principal característica su gran capacidad de adsorción, lo que le confiere innumerables aplicaciones en el sector industrial, “si el carbón tiene gran afinidad por la adsorción específica de un compuesto, la cantidad que puede remover de éste, es de hasta 60 gramos de contaminante por cada 100 gramos de carbón activado”⁴. Esta característica del carbón activado depende del tipo de materia prima que se implemente para la producción, además, las variables del proceso de carbonización y activación, la porosidad y área superficial del producto final.

Aunque la capacidad de adsorción del carbón activado es determinada principalmente por la porosidad, y el área superficial del material, no depende exclusivamente de estas propiedades, de acuerdo con el manual de carbón activado⁵, las sustancias polares se retienen débilmente sobre la superficie (apolar) del carbón. Para estos casos la fijación al carbono de “heteroátomos”, principalmente oxígeno e hidrógeno, forman estructuras o grupos funcionales tipo ácido carboxílico, lactosas, carbonilo, entre otras, que elevan la afinidad de las sustancias polares por la superficie del adsorbente.

Además de sus propiedades adsorbentes el carbón activado es un material muy versátil en la aplicación industrial debido a su estabilidad. “Uno de los adsorbentes que más se utiliza para la captura de CO₂ es el carbón activado por su gran capacidad adsorptiva y tolerancia al vapor de agua de los gases de combustión, alta estabilidad térmica, favorable cinética de adsorción, alta capacidad de adsorción a altas presiones, aunque presenta inconvenientes como la baja capacidad de adsorción a condiciones medias, diferentes precursores tienen diferente porosidad, se puede envenenar con impurezas como NO_x, SO_x”⁶.

1.2.1 Porosidad. Los poros son los espacios intermoleculares que se presentan en el interior de un sólido. La porosidad define el tamaño y cantidad de poros que contiene un material, los carbones activados presentan una elevada porosidad, lo que le da buenas propiedades adsorptivas al material. Los poros presentes en el carbón activado se clasifican de acuerdo a su tamaño por la nomenclatura

⁴ OOCITIES. Ingeniería de tratamiento y acondicionamiento de Aguas. Tratamiento con carbón activado. Oocities.org. [En línea] disponible en <<http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/carbon6.pdf>> [citado el 10 de octubre de 2016]

⁵ AGUAPEDIA. Trabajo de grado Máster en Ingeniería del Agua. Manual del Carbón Activado. España: Escuela Politécnica Superior Universidad de Sevilla.

⁶ LOPEZ, Juan. Desarrollo de un carbón activado granular mediante activación física en un horno rotatorio. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Minas. Procesos y energía. Medellín. 2014

establecida por la IUPAC en: microporos, mesoporos y macroporos (Tabla 1). Como enuncia González⁷, los microporos y mesoporos corresponden a la mayor porción del área superficial y adsorben generalmente sustancias de fase líquida y gaseosa, más volátiles que el agua. Los macroporos atrapan moléculas más grandes, como compuestos clorados o sustancias húmicas. En general, un tamaño adecuado de los poros debe oscilar entre 1 y 5 veces el diámetro de la molécula a retener.

Tabla 1. Clasificación IUPAC de poros según el tamaño

Tipo	Tamaño (nm)
Microporos	< 2
Mesoporos	2 – 50
Macroporos	> 50

Fuente: IUPAC. Manual of symbols and terminology for physicochemical quantities and units, AppendixII, Part I; p.585

1.2.2 Área superficial. El área superficial es la parte de un sólido que está expuesta a interactuar (física o químicamente) con las moléculas que se encuentren a su alrededor, una elevada área superficial le da las características de adsorción al carbón activado, entre mayor sea esta, sus propiedades adsorptivas mejoran. Los carbones activados presentan elevadas áreas superficiales del orden de 500 a 1500 m²/g de carbón, e incluso llegar a desarrollar áreas mayores hasta los 3000 m²/g. Los elevados valores de área superficial se deben a la cantidad y tamaño de los poros que presentan los materiales carbonosos. Esta propiedad varía dependiendo el tipo de materia prima que se esté utilizando, además de los procesos de carbonización y activación. Durante la activación del carbonizado se inyecta vapor que hace que el material se active y crea porosidad, y a su vez eleve el área superficial.

Algunos de los métodos implementados para determinar el área superficial de carbón activado son: el índice de yodo --determinado por la concentración de una solución de yodo después de estar en contacto con una muestra de CA y titulada con tiosulfato de sodio 0,1N- el índice de azul de metileno -que define el área superficial del carbón activado como el número de mililitros de una solución estándar (0,15% de AM) decolorados por 0,1 g de CA; y la prueba BET por el cual se obtiene el área superficial del carbón activado por adsorción física de nitrógeno.

1.2.3 Composición química. “Su composición es aproximadamente un 75-80% de carbono, 6% de oxígeno, 5-10% de cenizas y 0.5% de hidrógeno”⁸. Es Carbono

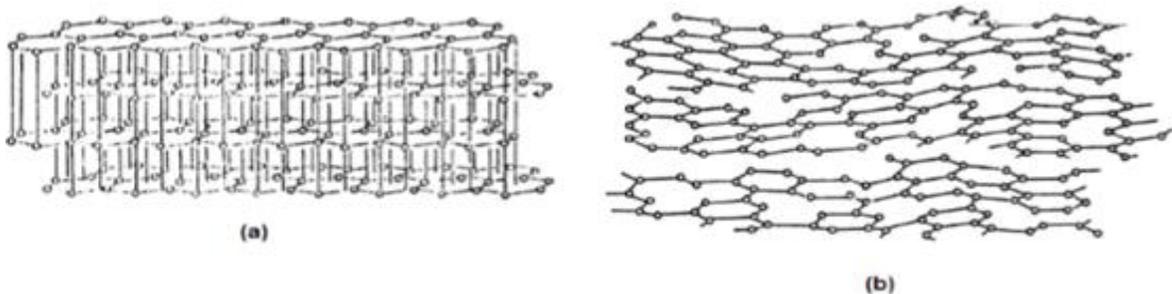
⁷ GONZALEZ, Lourdes. GARCIA, Ariel. GOMEZ, Alain. RODRIGUEZ, Clara. PADRON, Rolando. El carbón activado, un material adsorbente. Cuba: Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos; p.4

⁸ BLANCO CALVO, Olaia. Trabajo de grado Ingeniería Química. Tecnologías de membranas y de adsorción en procesos de potabilización de aguas salobres para la eliminación de compuestos disueltos. 2011. España: Universidad Politécnica de Cataluña.

(C) prácticamente puro, debido a que en el interior de los poros del material se pueden hacer presentes otros elementos producto de los procesos de descomposición térmica de la materia prima.

1.2.4 Estructura física. La estructura origina la distribución de los poros en el material. El carbón activado posee una estructura poco ordenada debido a su alta porosidad y a su vez el tamaño del área superficial, lo cual depende de factores como: el proceso de producción, materia prima, variables del proceso, entre otros. En la estructura de carbón activado la distancia interatómica entre los átomos de carbón en las capas planas individuales es $1,42 \text{ \AA}$, las capas planas están en arreglo paralelo con un espacio intercapa de $3,35 \text{ \AA}$, como se muestra en la figura 1, además, presenta una comparación del ordenamiento cristalino entre el grafito (a) y el CA (b) donde se observa que los átomos de carbón activado tienen un ordenamiento en forma de placas gráficas y un ordenamiento menos perfecto.

Figura 1. (a) Arreglo estructural de las capas de grafito, (b) Estructura propuesta de las capas de carbón activado, unidades en \AA



Fuente: FERNANDEZ, R. HUERTEMENDIA, M.,2005. Obtención de carbones activados microporosos para la purificación de gases, 1ª Convención Cubana de Ciencias de la Tierra, I Congreso Cubano de Minería. La Habana, Cuba. Modificado por el autor.

1.3 MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS PARA LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

Se caracterizan principalmente por tener un alto contenido de carbono en su estructura química y bajo contenido de impurezas inorgánicas. Teniendo en cuenta que ciertas variaciones de las propiedades del carbón activado obtenido, difieren del precursor que se utilice junto con las variables del proceso de producción. Algunas de los materiales utilizados para la fabricación de carbón activado son: la madera, cascara de coco, cuesco de palma, turba, cascarilla de arroz, carbón

vegetal o mineral, entre otros. Las principales propiedades que debe tener la materia prima para la producción de carbón activado son⁹:

- Disponibilidad y bajo costo
- Estructura inherente de poros
- Alto contenido de carbono
- Bajo contenido de material inorgánico
- Alto rendimiento en masa
- Bajos índices de degradación durante el almacenamiento

La tabla 2 muestra algunas materias primas con distintos valores de dureza utilizadas como precursores de CA y sometidas a diferentes tratamientos, como consecuencia hay variaciones en los tamaños de poro de cada carbón activado.

Tabla 2. Principales materias primas y tecnologías con las que se fabrican carbones activados y valores típicos de las propiedades obtenidas

MATERIA PRIMA	MÉTODO DE ACTIVACIÓN	DUREZA O RESISTENCIA A LA ABRASIÓN	RADIO MEDIO DE PORO	RADIO DE PORO DOMINANTE
Madera de pino	Deshidratación química*	30-50	200 a 2,000 nm	50 - 10,000 nm
Carbón mineral lignítico	Térmica**	40-60	3.3 nm	1 - 1,000 nm
Carbón mineral bituminoso	Térmica**	70-85	1.4 nm	1 - 100 nm
Concha de coco	Térmica**	90-99	0.8 nm	<10 nm

*Generalmente con ácido fosfórico y en ocasiones con cloruro de zinc. También hay empresas que lo activan térmicamente.

**En atmósfera saturada de vapor de agua o con gases de combustión.

Fuente: RAMIREZ GUERRA, Christian. Carbón activado para el tratamiento del agua. 2009. México: Universidad de Sonora.

El uso de algunos residuos lignocelulósicos con elevados contenidos de carbono como materiales precursores de carbón activado, es una buena alternativa para darle manejo y aprovechamiento adecuado a estos, además, incrementa la generación de un producto a bajo costo.

1.4 CUESCO DE PALMA AFRICANA PARA LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

Elaeis Guineensis comúnmente conocida como palma africana deriva su nombre del griego *Eleia*, que significa oliva por sus frutos ricos en aceite y de guineensis por

⁹ MARSH, H.; HEINTZ; ROGUIDEZ-REINOSO, F.: Activated Carbon. London y otras: Elsevier, 2006. Citado por: GOMEZ, Alexander. KLOSE, Wolfgang. RINCON, Sonia. Carbón activado de cuesco de palma. Estudio de termogravimetría y estructura. Kassel, 2010.

la procedencia de su origen (Golfo de Guinea, África occidental). En su estado natural llega a superar los 40 metros, pero bajo cultivo solo se le permite los 12 m de altura. “Es propia de la región tropical calurosa, crece a altitudes por debajo de los 500 m sobre el nivel del mar, aunque se desarrolla bien en regiones pantanosas. Su tallo o estípote es erecto y tiene la forma de un cono invertido. Antes de envejecer es áspero, pero cuando llega a la vejez se vuelve liso y se presenta segmentado por las cicatrices que le imprimen sus cerca de cuarenta hojas al marchitarse y caer.”¹⁰El cuesco de palma es una de las partes del fruto de la palma africana encargado de proteger la almendra (figura 2), se caracteriza por ser un material vegetal de tipo lignítico duro con estructura porosa, rodeado y atravesado por fibras.

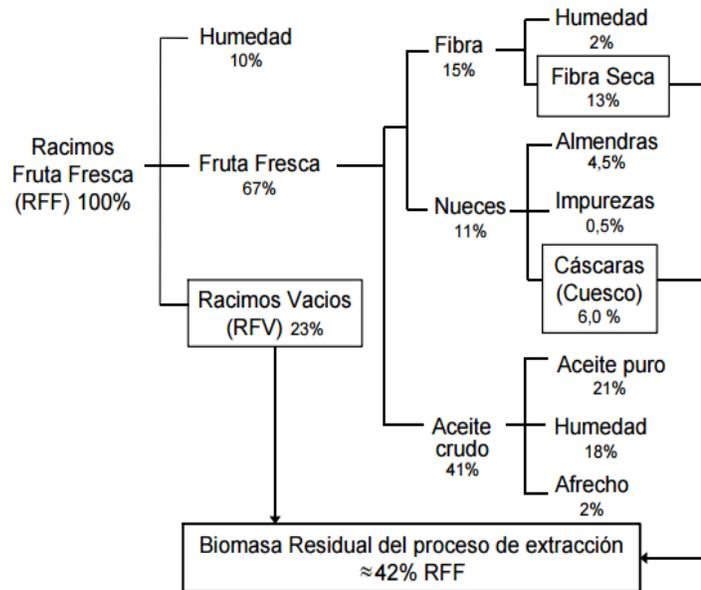
Figura 2. Cuesco de palma africana



Como se evidencia en la figura 3, el cuesco de palma es un residuo generado en la extracción de los aceites de palma africana se obtiene luego de la recuperación de la almendra de manera concentrada lo que les da una ventaja con respecto a otros tipos de biomasa. De acuerdo con el diagrama del proceso de extracción del aceite de palma en la figura 3 representa el 6% de la masa total de los racimos de fruta fresca.

¹⁰ OLEOFINOS, S.A de C.V. Aceite de palma. La Palma africana. México. [Sitio web] Disponible en: < http://palma.aceitescomestibles.com/index.php?option=com_content&view=article&id=5:la-palma-africana&catid=48:datos-generales&Itemid=1>

Figura 3. Diagrama del proceso de extracción del aceite de palma. Humedad en base seca.



Fuente: GOMEZ, Alexander. KLOSE, Wolfgang. RINCON, Sonia. Pirolisis de biomasa: cuesco de palma. Kassel, Alemania: Kassel University Press.2008.

Según la guía ambiental de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia el área cultivada llega a las 365.000 hectáreas¹¹ por lo tanto, durante el proceso de tratamiento para la extracción del aceite se generan grandes volúmenes de residuos de cuesco de palma, cerca de 300.000 toneladas anuales para finales del año 2010. Además de la abundancia local y el bajo costo de la materia prima, un precursor de carbón activado debe tener elevado contenido de materia orgánica en su estructura química. En la tabla 3 se muestra el porcentaje de composición química (lignina, celulosa, y hemicelulosa) de los constituyentes del residuo generado en la extracción del aceite de palma (cuesco, tusa, fibra), además, el porcentaje de extractivos (agua, etanol, hexano) y poder calorífico de cada residuo. Siendo el cuesco el de mayor contenido de carbono en su estructura por el elevado porcentaje de lignina que contiene respecto a los demás residuos, lo que le permite tener las propiedades necesarias para ser un precursor idóneo del carbón activado.

¹¹ FEDEPALMA. Febrero. 2011. Guía ambiental de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia. [Sitio web] Disponible en: <<http://www.ambientalex.info/guias/Guiambagrpalaceco.pdf>>

Tabla 3. Principales componentes del cuesco, tusa y fibra de la palma africana

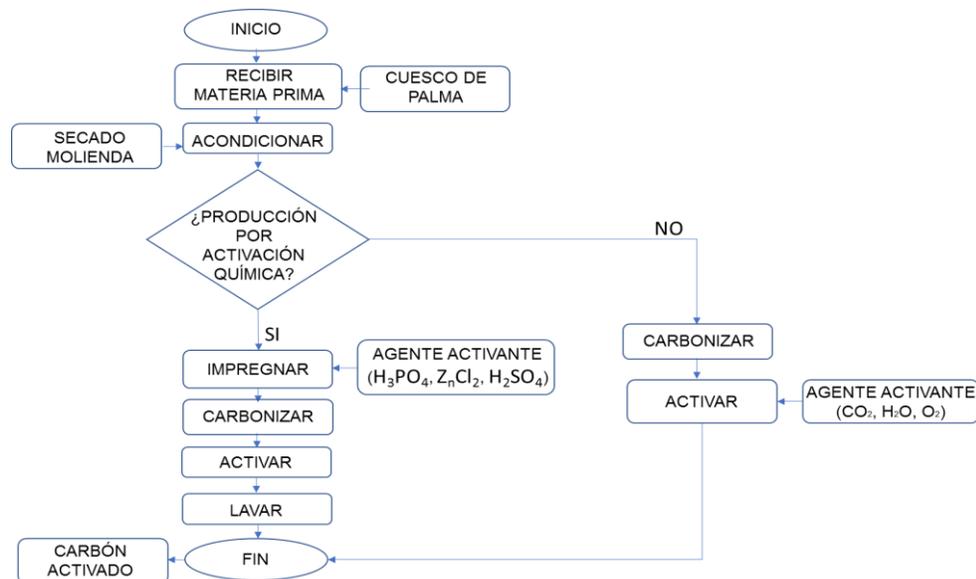
Componentes	Biomasa		
	Cuesco	Tusa	Fibra
Lignina (%)	49,58	10,23	21,79
Celulosa (%)	30,28	44,97	33,21
Hemicelulosa (%)	12,72	19,92	16,58
Extractivos (%)	7,13	19,32	19,34
*PCS (KJ/Kg)	21.445	8.165	19.201

Fuente: GARCIA, Jesús. CARDENAS, Mónica. YAÑEZ, Edgar. Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio de palma de aceite en Colombia. Bogotá. 2010.

1.5 PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

El proceso de producción de carbón activado tiene como fin generar un material poroso con alta capacidad de adsorción a partir de un material carbonoso. El proceso general de la producción de carbón activado se muestra en la figura 4, que consiste en el acondicionamiento y selección del tipo de tratamiento que se le va a dar a la materia prima para la producción de carbón activado (activación física o activación química). Por tratamiento térmico, la eliminación de los componentes volátiles e inorgánicos que contenga el precursor a utilizar (Carbonización), seguido del incremento de volumen y diámetro de los poros generados en la carbonización (Activación).

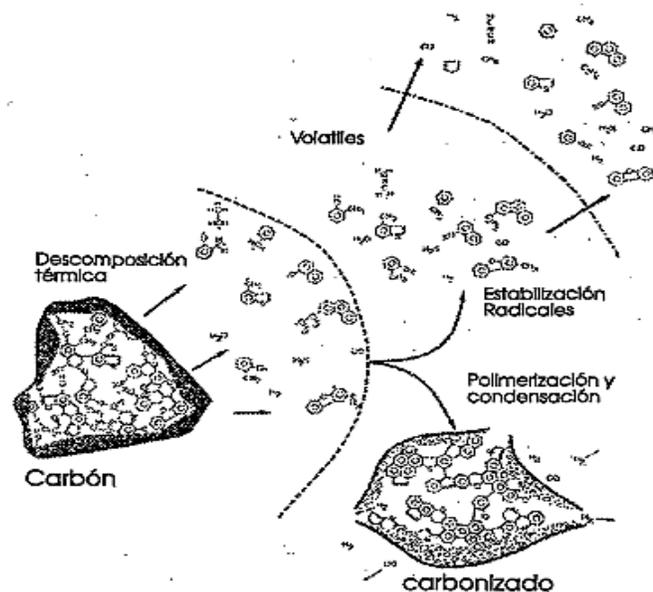
Figura 4. Diagrama de proceso de producción de CA



1.5.1 Recepción y acondicionamiento de materia prima. Se recibe la materia prima y se adecua para iniciar el proceso de producción de CA; el material es secado, molido y tamizado con el fin de mejorar la calidad del proceso de carbonización y activación, pues se reduce el contenido de humedad, además se disminuye y selecciona el tamaño de partícula de cuesco que va a ingresar a los hornos. La producción de carbón activado se lleva a cabo principalmente en dos etapas: la carbonización de la materia prima y la posterior activación, que puede ser química o física.

1.5.2 Carbonización. En este proceso el material precursor se somete a temperaturas inferiores a 700°C en ausencia de oxígeno para deshidratar y eliminar todo el contenido volátil de manera controlada. Durante el proceso de carbonización se generan reacciones de descomposición del material (figura 5). Inicialmente los enlaces menos estables generan un numeroso grupo de radicales libres muy reactivos, algunos de ellos se estabilizan y reaccionan con hidrogeno para producir material volátil. Ocurren reacciones de polimerización y condensación para los demás radicales libres que forman la estructura sólida del carbonizado. Se obtiene un material con alto contenido de carbono fijo y con estructura porosa inicial, pues durante la carbonización los elementos no carbonosos se eliminan como gases combustibles del proceso y los átomos de carbono se reorganizan en cristales grafiticos elementales, que son estructuras microcristalinas poco ordenadas. Este tipo de estructura genera espacios o poros en la superficie solida del material.

Figura 5. Descomposición térmica en la carbonización



Fuente: MARTIN GULLON, Ignacio. Diseño, construcción y operación de una planta piloto para la obtención de carbones activados. Universidad de alicante. Alicante, España.

El material carbonizado puede presentar diferentes propiedades dependiendo de variables del proceso tales como: el tipo de materia prima que se utiliza, la temperatura, tiempo de residencia, tasa de calentamiento. “Parece ser que el efecto más importante es la temperatura final del proceso, ya que está asociada a la necesidad, por parte de las macromoléculas, de cantidades de energía suficientes para producir la ruptura de un mayor número de enlaces químicos, y por tanto permitir una mayor salida de productos volátiles. Esto produce en el carbonizado una mayor compactación.”¹²

1.5.3 Activación. El proceso de activación tiene como fin limpiar y liberar los poros del carbonizado para incrementar la porosidad y el área superficial, lo que le aporta sus propiedades adsorbentes. Es importante tener control de la temperatura y tiempo a la que se lleva el material para no dañar el material y a su vez las propiedades adsorbentes del carbón activado que se va a producir. Este proceso se puede realizar de dos maneras:

- **Activación Química.** Cuando se lleva a cabo la activación química se hace primero una impregnación del componente químico activante a la materia prima, de esta forma durante la descomposición térmica se degrada todo el material inorgánico, los activantes químicos más utilizados en la industria son: hidróxido de sodio y potasio, ácido fosfórico, cloruro de zinc, y ácido sulfúrico. El agente activante se deja actuar por determinado tiempo en la materia prima y luego se lleva a cabo un proceso térmico en ausencia de aire, donde se desarrolla la carbonización y activación. La porosidad se forma de la descomposición térmica desde 350 a 900°C, “en esta etapa, la impregnación química deshidrata el precursor carbonoso, incrementando el grado de aromatización de la matriz carbonosa y creando una estructura porosa tridimensional rígida, favorecida por el entrecruzamiento de la matriz del carbón activado. Posteriormente el producto pirolizado se enfría y se lava para eliminar el exceso de agente activante”¹³. En gran medida la viabilidad de este tipo de activación depende del grado de recuperación del componente químico que se impregna a la materia prima, para ser reutilizado.
- **Activación Física.** Este proceso se lleva a cabo a temperaturas entre 800 – 1000°C. Se inyectan dentro del horno gases como CO₂, H₂O, O₂, entre otros, para aprovechar las propiedades oxidantes de estos, ocasionando que los átomos de carbono que están dentro de los poros se oxiden y de esta manera se liberen los poros, generando mayor porosidad en la estructura. Las reacciones químicas que

¹² MARTIN GULLON, Ignacio. Diseño, construcción y operación de una planta piloto para la obtención de carbones activados. Universidad de Alicante. Alicante, España.

¹³ GONZALEZ GARCIA, Ana. Tesis doctoral Ingeniería Química. Residuos biomásicos como precursores de absorbentes para la captura de CO₂ en condiciones de postcombustión. 2013. Universidad de Oviedo. España.

se desarrollan en esta etapa del proceso dependen del tipo de gas activante que se utiliza. En la tabla 4, se presentan los tipos de reacciones según el agente activante que este en el ambiente del horno; las heterogéneas se presentan entre el gas activante y el carbonizado y las homogéneas entre los productos volátiles y el agente activante. El objetivo en esta fase es desprender las partes más reactivas de la estructura del carbonizado en forma de monóxido o dióxido de carbono.

Tabla 4. Tipos de reacciones de la gasificación

Reacciones heterogéneas, Gas / Sólido	
R ₁	Reacción heterogénea con vapor de agua $\text{C}_{(s)} + \text{H}_2\text{O}_{(g)} \longrightarrow \text{CO}_{(g)} + \text{H}_2_{(g)}$
R ₂	Reacción de Boudouard $\text{C}_{(s)} + \text{CO}_2_{(g)} \longrightarrow 2\text{CO}_{(g)}$
R ₃	Hidrogenación $\text{C}_{(s)} + 2\text{H}_2_{(g)} \longrightarrow \text{CH}_4_{(g)}$
R ₄	Combustión parcial $\text{C}_{(s)} + 1/2\text{O}_2_{(g)} \longrightarrow \text{CO}_{(g)}$
R ₅	Combustión $\text{C}_{(s)} + \text{O}_2_{(g)} \longrightarrow \text{CO}_2_{(g)}$
Reacciones homogéneas, Gas / Gas	
R ₆	Reacción homogénea con vapor de agua $\text{CO}_{(g)} + \text{H}_2\text{O}_{(g)} \longrightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2_{(g)}$
R ₇	Metanización $\text{CO}_{(g)} + 3\text{H}_2_{(g)} \longrightarrow \text{CH}_4_{(g)} + \text{H}_2\text{O}_{(g)}$

Fuente: GOMEZ, Alexander. KLOSE, Wolfgang. RINCON, Sonia. Carbón activado de cuesco de palma. Estudio de termogravimetría y estructura. Kassel, Alemania: Kassel University Press.2010. p. 21. Modificado por el autor.

1.6 TIPOS DE CARBÓN ACTIVADO

El carbón activado se clasifica de acuerdo a su granulometría de tres formas diferentes: granular (a), polvo (b) o pelletizado (c), como se aprecia en la figura 6. “El polvo consiste en carbón pulverizado con un tamaño predominantemente inferior a 0,1 mm utilizado principalmente en aplicaciones en fase líquida; los granos consisten en partículas de forma irregular con tamaños que van desde 0,5 a 5 mm; los pellets y extruidos tienen dimensiones que varían de 1 a 5 mm de ancho y

longitudes de 5 a 10 mm. La forma granular y pelletizado se utiliza en aplicaciones de fase líquida y en fase gaseosa¹⁴. Sin embargo, aunque este clasificado de acuerdo a la forma física en que se presenta el producto básico es el mismo y trabaja bajo el mismo principio, existen otras presentaciones de carbón activado que son producto de tratamientos que se les dan a los tipos ya mencionados.

Figura 6. Tipos de carbón activado.



Fuente: ROMERO, Joaquín. Aplicación e impacto de la adsorción de gases en sólidos. 27 de julio de 2015. Disponible en: <https://adsorciondegasesensolidos.wordpress.com/2015/07/27/3/>. Modificado por el autor.

1.7 USOS DEL CARBÓN ACTIVADO

El carbón activado es un material muy versátil con un numeroso campo de aplicación gracias a sus excelentes capacidades de adsorción, que se relaciona directamente con sus características fisicoquímicas como: materia prima, estabilidad térmica del carbón activado, el área superficial, la porosidad y además el tamaño del poro del carbón activado. “El carbón activado se utiliza en la purificación del gas, la purificación del oro, la extracción del metal, la purificación del agua, la medicina, el tratamiento de aguas residuales, los filtros de aire en máscaras de gas y respiradores, los filtros en aire comprimido y muchas otras aplicaciones. Una aplicación industrial importante implica el uso de carbón activado en el campo de acabado metálico. Se emplea muy ampliamente para la purificación de soluciones de galvanoplastia. El tratamiento con carbón activado elimina tales impurezas y restaura el rendimiento del galvanizado al nivel deseado”¹⁵

Se concluye en el capítulo que el carbón activado tiene un amplio campo de aplicación en el sector industrial por sus propiedades, lo cual hace factible la estandarización del proceso para su producción y comercialización. Además, de acuerdo a la revisión bibliográfica realizada se establece el cuesco de palma como

¹⁴KWIATKOWSKI, James F. Carbón Activado: Clasificaciones, Propiedades Y Aplicaciones. Nueva York: Nova Science Publishers, Inc, 2012. p. 250. Colección de libros electrónicos (EBSCOhost).

¹⁵Ibíd., p. 255.

un material óptimo para la producción de CA; ya que cumple con las principales características de un material precursor y por sus propiedades fisicoquímicas.

2. CARACTERIZACIÓN DEL CUESCO DE PALMA PARA LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

Debido a la complejidad composicional y estructural de la biomasa se realiza análisis último y análisis próximo para el cuesco de palma que se utiliza como precursor de CA; el análisis último o elemental consiste en la determinación del contenido de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S) y oxígeno (O) en una muestra y el análisis próximo comprende la determinación composicional en porcentaje másico de: humedad, cenizas, material volátil y el carbono fijo. La caracterización de la materia prima permite establecer relaciones entre sus características y el comportamiento durante los procesos térmicos de carbonización y activación.

2.1 ANÁLISIS ELEMENTAL DEL CUESCO DE PALMA

De acuerdo a los análisis previos realizados con el cuesco de palma utilizado en la producción de carbón activado a escala planta piloto, se determinó la composición química del cuesco con un análisis elemental siguiendo las normas ASTM (American Society for testing and Materials); hidrogeno (H) y carbono (C) (ASTM D3178), nitrógeno (N) (ASTM D3179) determinados con un equipo analizador CHN Exeter CE-440 en el que la muestra sufre una combustión a 850°C en atmósfera de oxígeno, el porcentaje de azufre (S) (ASTM D3177) se calculó por con el método Eschka, el porcentaje de oxígeno que contiene la materia prima se determina por diferencia. En la tabla 5 se presentan los resultados del análisis elemental realizado por Diaz y Duran¹⁶, en su trabajo de grado “Obtención de carbón activado a partir de cuesco de palma por activación física a escala planta piloto” y en la tabla 6 los resultados del análisis elemental realizados por Emery¹⁷ en su tesis “Destilación secundaria de alquitranes generados en la gasificación de cuesco de palma”.

Tabla 5. Análisis elemental del cuesco de palma (Ensayo 1)

Elemento	Porcentaje (%)
Hidrógeno	6,85
Carbono	50,1
Azufre	0
Nitrógeno	1,9
Oxígeno	41,15

Fuente: DIAZ, Tatiana. DURAN, Dayana. Obtención de carbón activado a partir de cuesco de palma por activación física a escala planta piloto. Bogotá: Fundación Universidad de América. (2008)

¹⁶ DIAZ, Tatiana. DURAN, Dayana. Obtención de carbón activado a partir de cuesco de palma por activación física a escala planta piloto. Bogotá: Fundación Universidad de América. (2008)

¹⁷ EMERY, Eder. Destilación secundaria de alquitranes generados en la gasificación de cuesco de palma. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. (2014)

Tabla 6. Análisis elemental del cuesco de palma (Ensayo 2)

Elemento	Porcentaje (%)
Hidrógeno	5,36
Carbono	46,83
Azufre	0,13
Nitrógeno	0,74
Oxígeno	46,94

Fuente: EMERY, Eder. Destilación secundaria de alquitranes generados en la gasificación de cuesco de palma. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. (2014)

Tomando los rangos de valores de los estudios previos realizados se establece una composición elemental promedio del cuesco de palma para la producción de CA, presentada a continuación:

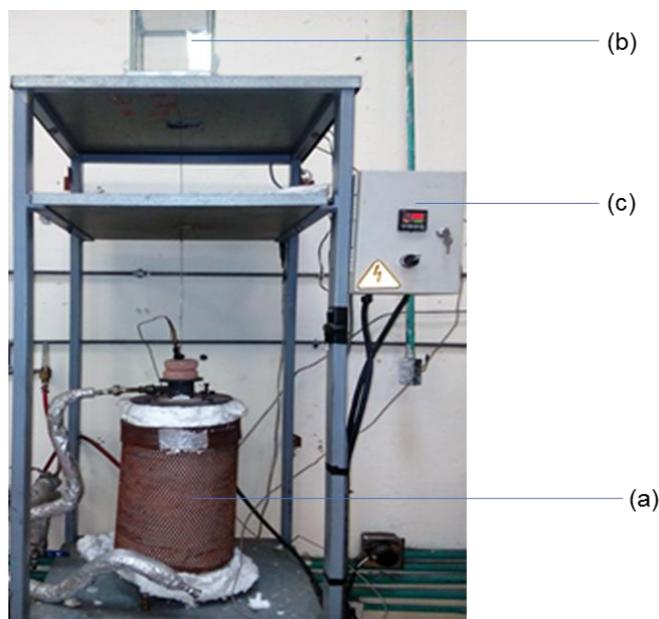
Tabla 7. Composición elemental promedio del cuesco de palma

Elemento	Porcentaje (%)
Hidrógeno	6,11
Carbono	48,47
Azufre	0,07
Nitrógeno	1,32
Oxígeno	44,45

2.2 ANÁLISIS PRÓXIMO DEL CUESCO DE PALMA

Para la caracterización de las muestras se emplea la norma ASTM D3172 que establece los análisis próximos de carbones y coques de la muestra preparada por métodos prescritos, para la determinación de cada uno de los parámetros de análisis próximo se realiza duplicado. Para hacer el análisis se utilizó el equipo termogravimétrico de la empresa industrias Tecsol Ltda. el cual mide los cambios de masa de una muestra por variaciones de temperatura controladas en función del tiempo. En la figura 7 se muestra el equipo TGA de la empresa, la muestra se introduce dentro del horno de calentamiento (a) y se inicia. La muestra se introduce dentro del equipo TGA (a) y se empieza a calentar, una balanza (b) ubicada en la parte superior del equipo se encarga de medir el cambio de masa que tiene la muestra y una termocupla (c) se ubicada en el interior del equipo mide los aumentos de temperatura, estas dos se conectan con un computador donde son registrados los datos cada 30 segundos. Por medio de este análisis se determinó el porcentaje másico de: humedad, material volátil, contenido en cenizas y carbono fijo de una muestra de cuesco de palma.

Figura 7. Equipo de Análisis TGA de Industrias Tecsol Ltda. (a) Horno de calentamiento. (b) Balanza. (c) Termocupla.



Previo al análisis en el equipo TGA se tomó una muestra de cuesco de palma secado al ambiente y se sometió a molienda para reducir su tamaño original y hacer una selección de la muestra a través del tamiz (Figura 8), la muestra molida se pasó por el tamiz con 4 mallas de diámetros diferentes descritos en la Tabla 8. La muestra para el análisis en el equipo TGA, debe pasar malla N.º 60 (0,25 mm) como lo indica la norma.

Tabla 8. Mallas utilizadas en análisis próximo

N.º de malla	Diámetro (mm)
20"	0,850 mm
30"	0,600 mm
40"	0,425 mm
60"	0,250mm
Fondos	<0,250mm

Fuente: CIVIL, Constructor. Granulometría: Mallas estándar, límites granulométricos de agregados y gravas. disponible en < <http://www.elconstructorcivil.com/2010/12/granulometria-mallas-estandar-limites.html>>

Figura 8. Muestras de cuesco de palma tamizado



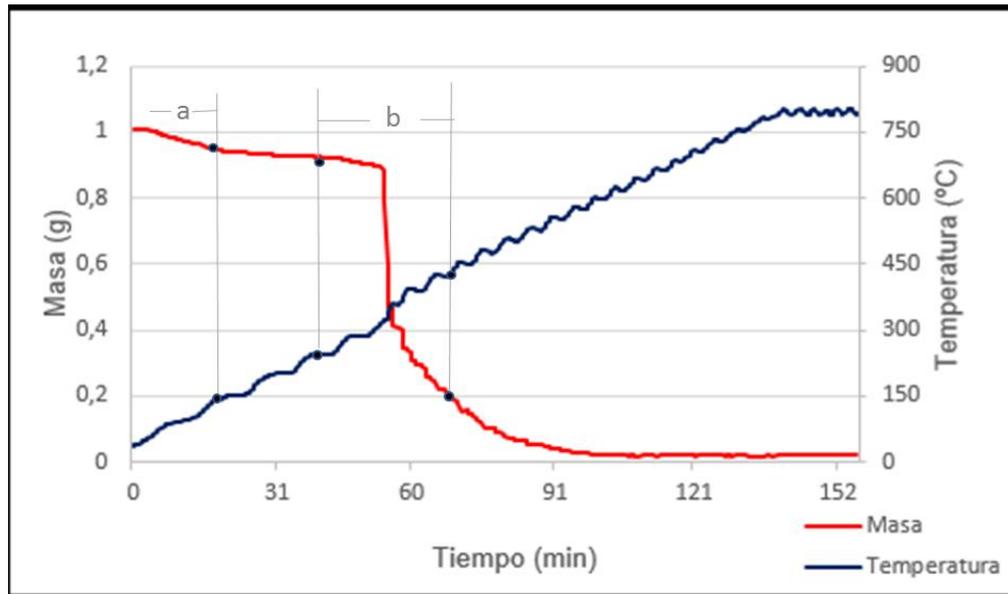
Para el análisis en el equipo TGA se tomó 1g de muestra de los fondos (figura 9) y se sometió a calentamiento continuo desde la temperatura ambiente hasta 800°C , en el computador conectado al equipo se registró las variaciones de masa y la temperatura de la muestra cada 30 segundos, el análisis tuvo un tiempo de duración de 2 horas y media (tiempo total ciclo TGA).

Figura 9. Muestra de cuesco tamizado (<math><250\ \mu\text{m}</math>)



Los resultados del análisis en el equipo TGA se presentan en la gráfica 1 donde se observa el cambio de masa que tuvo la muestra de cuesco con el aumento de temperatura a través del tiempo. Partiendo de estos datos recopilados por el TGA se determinan los porcentajes de humedad, material volátil, cenizas y carbono fijo contenido en la muestra de cuesco de palma, como lo indica la norma

Gráfica 1. Análisis de TGA para el cuesco de palma



Como se aprecia en la gráfica anterior hay dos segmentos representativos; (a) señala la sección donde el material pierde el contenido de humedad por el aumento de la temperatura durante los primeros 15 minutos del análisis, esto ocurre desde la temperatura ambiente hasta los 110°C donde la masa se mantuvo a 0,9642 por dos minutos. Posteriormente la sección (b) muestra la etapa donde el cuesco de palma por descomposición térmica elimina el contenido volátil de su estructura, esto ocurre entre 200°C-400°C y se aprecia una pérdida de masa significativa que va desde 0,9222 hasta 0,1401; respectivamente.

2.2.1 Humedad. El análisis de humedad se establece en la norma ASTM D3173. Tiene como fin determinar la cantidad de agua que contiene la muestra de cuesco de palma, que se está analizando, se calcula por diferencia de peso. La muestra se somete a una temperatura de 105°C \pm 5, por determinado tiempo hasta que la masa se mantenga constante.

Para la determinación del porcentaje de humedad en el cuesco de palma se toma una muestra de 1g de los fondos y se introduce en el equipo TGA. Se inicia el calentamiento desde la temperatura ambiente hasta alcanzar los 110°C punto en el que la masa de la muestra se mantiene constante teniendo un valor de 0,9642 g. Para calcular el porcentaje másico de humedad en la muestra de cuesco se utiliza la ecuación 1, como se establece en la norma.

Ecuación 1. Porcentaje de humedad

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

Donde:

%H = porcentaje másico de humedad.

W = peso de la muestra analizada (g).

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

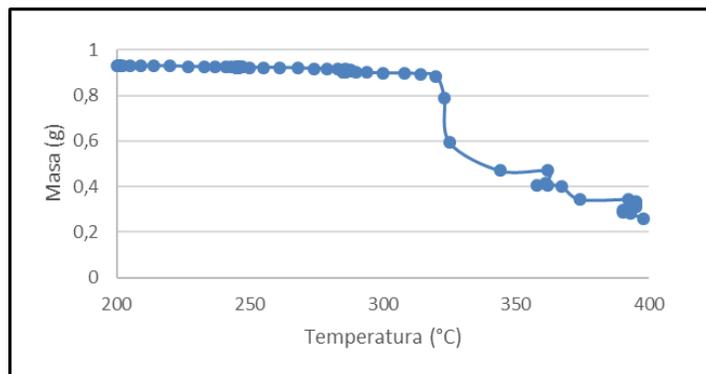
$$= \left(\frac{1g - 0,9642g}{1g} \right) * 100 = 3,58\%$$

Los datos para calcular el porcentaje de humedad fueron tomados de los registros del análisis termogravimétrico del cuesco (ANEXO A).

El porcentaje de humedad en la materia prima para la producción de carbón activado debe ser bajo (2-10%) para no afectar las reacciones de descomposición térmica del material, en la muestra de cuesco analizada el contenido de humedad fue de 3,58% lo que resulta favorable para la producción de carbonizado con este precursor.

2.2.2 Material volátil. El análisis de material volátil se establece en la norma ASTM D3175, determina la cantidad de material que está presente en las muestras de cuesco de palma que posee características físicas propias de un material que se eleva o dispersa en el aire como efecto al aumento de temperatura. Después de eliminado el contenido de humedad se prosigue con el calentamiento para que se desvolatilice la muestra analizada, en el análisis termogravimétrico esto ocurre desde 200°C hasta 400°C. La gráfica 2 muestra el comportamiento de la masa de cuesco en este rango de temperatura, disminuyendo considerablemente pues la estructura del cuesco de palma empieza a sufrir una descomposición térmica lo que ocasiona la eliminación del material volátil en la muestra.

Grafica 2. Desvolatilización del cuesco en el equipo TGA



De acuerdo a la norma ASTM D3175 para calcular el porcentaje de material volátil en la estructura de la muestra se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 2. Porcentaje materia volátil

$$\%MV = \left(\frac{B - C}{W} \right) * 100$$

Donde:

%MV = porcentaje de material volátil.

C = peso de la muestra cuando alcanza una T= 400°C en (g).

$$= \frac{0,9642g - 0,258g}{1g} * 100 = 70,62\%$$

Se estima un elevado contenido de material volátil para el cuesco de palma por su estructura orgánica, a medida que se incrementa la temperatura se empiezan a liberar productos gaseosos constituidos principalmente por: agua, hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, sulfuros de hidrógeno y metano. El porcentaje de material volátil en la muestra de cuesco fue de 70,62% esto explica la significativa pérdida de peso por el efecto térmico.

2.2.3 Cenizas. Se realiza mediante la norma ASTM D3174, se hace con el fin de determinar la cantidad materia inorgánica que queda después de haber quemado la materia orgánica del cuesco de palma, se calcula de acuerdo a la ecuación 3. Se calienta la muestra hasta alcanzar los 800°C y se deja durante 2 horas siguiendo la norma, en una atmósfera en presencia de oxígeno para asegurar la combustión de todo el material posteriormente, la muestra se enfrió por 24h y se pesó por duplicado.

Ecuación 3. Porcentaje contenido de cenizas

$$\%C = \frac{D}{W} * 100$$

Donde:

%C = porcentaje másico de ceniza.

D = peso del residuo de la muestra (g).

$$= \frac{0,0354g}{1g} * 100 = 3,54\%$$

El contenido de cenizas en el cuesco de palma analizado es de 3,54%, lo que resulta favorable pues las cenizas pueden ser un contaminante de los poros del carbonizado impidiendo un desarrollo de la porosidad en la fase de activación.

2.2.4 Carbono fijo. “El carbono fijo es la parte que no es volátil y que quema en estado sólido. Se encuentra en el residuo de coque que queda en el crisol luego de determinado el material volátil. Si a este residuo se le restan las cenizas se obtiene el carbono fijo”¹⁸. De acuerdo a lo establecido en la norma ASTM D3172 calculados los valores de humedad, material volátil y cenizas, el porcentaje de carbono fijo se determina por la diferencia de la masa total de la muestra teniendo en cuenta los valores ya mencionados de acuerdo a la ecuación 4.

Ecuación 4. Porcentaje carbono fijo

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

Donde:

%CF = porcentaje másico de carbono fijo

$$\%CF = 100\% - 3,58\% - 70,62\% - 3,54\% = 21,5\%$$

Es importante que la materia prima del carbón activado tenga un contenido significativo de porcentaje de carbono fijo, pues es la parte estructural sólida del carbonizado y CA, es por esto que el porcentaje de carbono fijo en el cuesco de palma de 21,5% resulta apropiado para ser un buen precursor del carbón activado

En la tabla 9 se presentan los resultados del análisis próximo para el cuesco evidenciando la calidad de materia prima que se utiliza en la producción del carbón activado. El tiempo total del análisis en el equipo TGA fue de 2,5 horas.

Tabla 9. Análisis próximos del cuesco de palma

Análisis Próximos Cuesco de palma	% Humedad	% Material volátil	% Cenizas	% Carbono fijo
	3,58	70,62	3,54	21,5

Teniendo en cuenta los análisis realizados y la revisión bibliográfica se determina la caracterización del cuesco de palma africana y se concluye que es un material apto para la producción del carbón activado. El análisis elemental muestra su elevado contenido de carbono en la estructura química lo que resulta favorable pues durante

¹⁸ USUGA, Lina. Carbón, Análisis Próximo. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. [Sitio web] Disponible en: <[http://www.unalmed.edu.co/~ctcarbon/analisis_proximos.htm#Humedad superficial.>](http://www.unalmed.edu.co/~ctcarbon/analisis_proximos.htm#Humedad%20superficial.>)

el proceso de carbonización se elimina todo el material volátil, en su mayoría átomos de hidrogeno (H) y oxígeno (O), y el carbonizado queda compuesto principalmente de carbono; Estos átomos de carbono durante la carbonización se organizan en estructuras microcristalinas de manera irregular, desarrollando la porosidad inicial en el material.

Es conveniente que el material precursor del CA presente bajos contenidos máxicos de humedad y cenizas (2-10%) en la estructura para la generación de un carbonizado poroso con buenas características que favorezcan la fase de activación. Un elevado porcentaje de cenizas en la muestra es un problema ya que representa un contaminante para el carbonizado pues estos residuos inorgánicos se depositan en el interior de los poros del carbonizado lo que causa dificultad en el momento de la activación impidiendo que se liberen los poros para aumentar su tamaño y a su vez el área superficial del carbón activado. El contenido de material volátil en la estructura del cuesco es propio de si, pues el cuesco se compone de lignina, celulosa y hemicelulosa que por efecto de la temperatura se descomponen en estructuras más pequeñas y se eliminan como volátiles.

3. EVALUACION DE LA TEMPERATURA Y TIEMPO DE RESIDENCIA EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO

Durante la producción de carbón activado es importante tener en cuenta las variables del proceso pues de éstas dependen las propiedades del producto terminado, algunas de estas son: el tiempo de residencia, la temperatura, diámetros de partícula de la materia prima, tasa de calentamiento de los hornos, flujos másicos de las corrientes de gases que ingresa a los hornos durante el proceso, entre otros. De acuerdo a revisión bibliográfica y a análisis previos realizados por Industrias Tecsol se selecciona el tiempo de residencia y la temperatura como variables críticas en el proceso de producción de CA. Para el desarrollo de este capítulo se evalúan las variables críticas en la fase de carbonización y activación para conocer el efecto de éstas en las características del producto final.

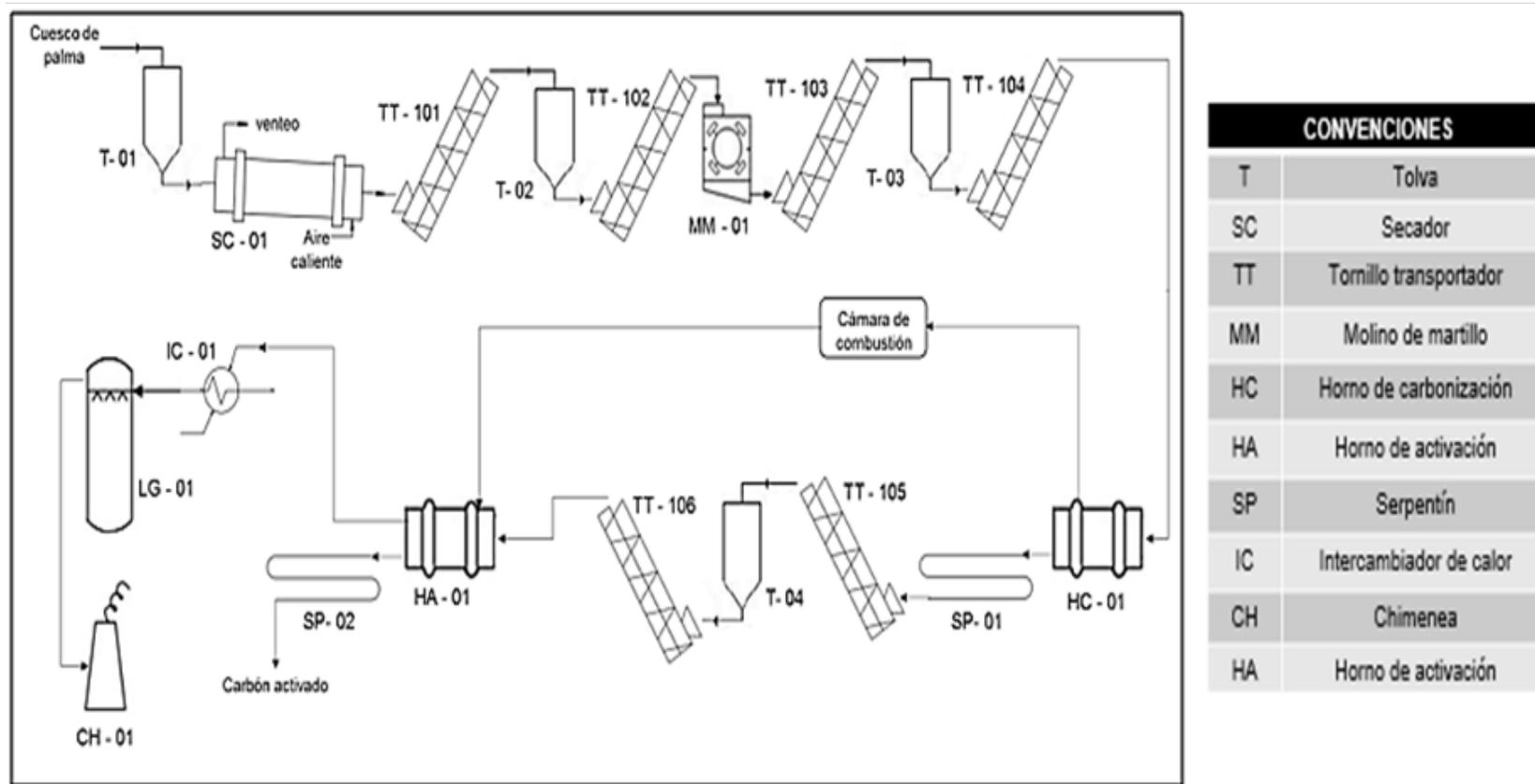
3.1 PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO EN INDUSTRIAS TECSOL Ltda.

La producción de CA se lleva a cabo en las instalaciones de la empresa de Tecsol ubicadas en el municipio de Soacha, se selecciona el cuesco de palma como materia prima pues cumple con las propiedades para ser un precursor idóneo y se elige la producción de CA por activación física debido a que la activación química ocasiona más daños al ambiente por el uso del agente químico activante y su posterior lavado o tratamiento para su reutilización, además, la favorabilidad de costos. El procedimiento habitual que se sigue para la producción es el siguiente:

1. El cuesco de palma se limpia y seca con el fin de retirar el material sólido que contamina y ensucia el cuesco posteriormente, se somete a molienda con el fin de disminuir y seleccionar el tamaño de partícula utilizando una malla de 6mm de diámetro para el molino.
2. Se define la cantidad de cuesco que se va a procesar, los hornos de la planta tienen la capacidad de procesar entre 50-200 kg. En el horno de carbonización el cuesco de palma ya triturado se somete a temperaturas elevadas (400°C-600°C) con el objetivo de formar el material carbonizado pues se elimina el contenido de humedad y material volátil, este proceso es muy importante en la preparación de la estructura porosa inicial del material para proceder a su activación.
3. Seguidamente se lleva a cabo el proceso de activación que consiste en incrementar el volumen y diámetro de los poros creados en la etapa de carbonización y crear una nueva porosidad, este proceso se lleva a cabo a elevadas temperaturas, entre 800-1000°C. La estructura de los poros y el tamaño de estos depende de la materia prima y en gran medida de las variables del proceso de activación.

3.1.1 Diseño del proceso. Actualmente la planta de producción de carbón activado de Industrias Tecsol Ltda. se encuentra automatizada y tiene una capacidad de producción continua de 1ton/día; además, cuenta con un sistema de aprovechamiento de los gases volátiles producto de la carbonización que son utilizados durante la activación, lo que permite mejorar la eficiencia térmica del proceso. El proceso de producción de carbón activado se describe a continuación:

Figura 10. Diseño de proceso de producción de CA



En la figura 10 se observa el diseño del proceso de la planta de producción de carbón activado de la empresa. Primero, el cuesco de palma entero ingresa al secador (SC-01) con el fin de eliminar el contenido de humedad y facilitar el proceso de descomposición térmica en la carbonización, el material seco ingresa en la tolva de almacenamiento de cuesco. El cuesco entero seco proveniente de la tolva es transportado hasta el molino de martillos (MM-01) donde el material reduce su tamaño y se selecciona el tamaño de partícula, a través de una malla de 6 mm que está en el interior de este.

El material molido se almacena y queda listo para ser introducido al horno de carbonización (HC-01) el cual opera a temperaturas inferiores a los 700°C en ausencia de oxígeno, allí el material por efecto de la temperatura se descompone, eliminando en su totalidad el contenido de humedad y material volátil del cuesco originando porosidad inicial en el material. Como lo menciona Romero Millán¹⁹, durante el proceso de carbonización la degradación de la biomasa tiene consecuencias en su composición elemental, el porcentaje de carbono (C) se incrementa con la temperatura de pirólisis mientras que los contenidos de hidrógeno (H) y oxígeno (O) se ven reducidos. De la misma forma, el contenido de materia volátil se hace menor con el incremento de la temperatura en el proceso mientras que el porcentaje de carbono fijo aumenta. El cuesco de palma introducido en el horno de carbonización tiene un tiempo de residencia entre 1 y 2 horas, al final del horno el material carbonizado cae a través de un serpentín (SP-01) que se conecta a este, para ser transportado por tornillos sin fin que conectan con la tolva de almacenamiento de material carbonizado (T-04), la cual abastece el horno de activación.

Durante el proceso de carbonización se generan gases volátiles como monóxido de carbono, dióxido de carbono y metano, producto de la descomposición térmica del cuesco de palma. Estos gases son conducidos a la cámara de combustión donde son quemados para aprovechar su potencial energético y mejorar la eficiencia térmica del proceso de activación, debido a que el horno de activación opera a temperaturas muy elevadas (800-1000°C). El control de la temperatura se realiza mediante el uso de termocupla ubicada en el centro de cada horno y se adecua según lo establecido.

El material carbonoso almacenado en la tolva de carbonizado es suministrado al horno de activación (HA-01) para limpiar, liberar y generar nuevos poros, eliminando los contaminantes que se depositan en el interior de los poros y los átomos de carbono más reactivos de la superficie del carbonizado, además origina un incremento en la porosidad y área superficial del material. El horno de activación opera a temperaturas cercanas a 1000°C con tiempo de residencia entre 1 - 1,5

¹⁹ ROMERO, Lina. CRUZ, María. SIERRA, Fabio. Efecto de la Temperatura en el potencial de aprovechamiento energético de los productos de la pirólisis del cuesco de palma. Universidad Francisco José de Caldas. Bogota.2016.

horas y se utiliza como agente activante vapor de agua. Como consecuencia del proceso, “se originan numerosos poros hendiduras y fisuras. Durante la activación tiene lugar una pérdida de masa que puede ser considerable y se produce incremento de la porosidad y a su vez aumento de la superficie interior (volumen de poros). Por ello, la activación tiene lugar bajo condiciones oxidantes, selectivas o controladas.”²⁰

Para liberar los gases generados en el horno de activación se conducen a través tubos de acero inoxidable hasta un intercambiador de calor (IC-01) con el fin de disminuir su temperatura, posteriormente son transportados hasta un lavador de gases (LG-01) para remover material contaminante y liberarlos a la atmosfera. El carbón activado producido cae a través de un serpentín que se conecta al horno de activación, posteriormente se enfría y se almacena el producto.

3.1.2 Equipos. La planta para producir carbón activado está organizada en un área de 102 m² (6X17 m), cuenta principalmente con dos hornos rotatorios uno para llevar a cabo la fase de carbonización y otro para la activación, cada uno tiene un recubrimiento de fibra de vidrio para disminuir las pérdidas de calor por las paredes de los hornos. Como fuente de energía para el uso de los hornos se recurre a gas natural y energía eléctrica. La capacidad del horno de carbonización de la empresa está entre 50 a 200 kg/h de cuesco de palma y cuenta con un ángulo de inclinación que puede estar entre 3° y 10°.” La longitud efectiva de este horno es de 6,6 m, el diámetro interno es de 0.7 m y cuenta con una velocidad de giro graduable entre 0,3 y 3 rpm, los rendimientos estimados son 34 % para carbonizado, 17 % para gas y un 49 % bioaceite”²¹(alquitranes presentes en forma gaseosa). El horno activación tiene una capacidad de procesar entre 50 y 100 kg/h de carbonizado con un tiempo de residencia que oscila entre 45 y 120 min su longitud efectiva es 4,8 m y su diámetro interno es de 0.85 m, una velocidad de giro graduable entre 0,3 y 3 rpm, y la posibilidad de variar su ángulo de inclinación entre 3° y 10°.

A continuación, se listan los equipos que constituyen la planta automatizada para la producción de carbón activado. En el anexo B se presenta el diseño de la planta y la lista de equipos que la conforman más detalladamente:

- Horno de carbonización; L 4,5 m. d; 1,2; Lamina HR 1” recubierta en refractario.
- Horno de Activación L = 6m; d = 0,9m; lamina HR recubierta en refractario.
- Secador para cuesco.
- Molino de martillos para reducir tamaño de cuesco a 6 mm.
- Tornillos transportadores: Transporte de material entre operaciones.
- Intercambiadores de calor para enfriar gases de combustión y precalentar aire para secado y combustión.

²⁰ VARRIANO, Nicolás. GIL, Marcelo. COZZARIN, Raúl. Producción sustentable de carbón activado a partir de caña de bambú. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata. Argentina.

²¹ TECSOL Ltda. Mejoramiento de la planta piloto de carbón activado de Tecsol para explotación comercial. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.2016

- Sopladores. Inyectan el aire a los intercambiadores.
- Zarandas. Clasificación en la descarga de los hornos.

3.2 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y EL TIEMPO DE RESIDENCIA EN LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

Como se mencionó anteriormente algunas variables son más influyentes que otras en las propiedades finales del producto, se tuvieron en cuenta algunos estudios realizados previamente para la selección de la temperatura y el tiempo de residencia como variables críticas del proceso de producción del carbón activado. Romero Millán²², concluye en su artículo que la degradación de la biomasa genera consecuencias en su composición elemental; el contenido de carbono (C) aumenta con el incremento de la temperatura mientras que los contenidos de hidrogeno (H) y oxígeno (O) se ven reducidos (ver figura 11). Teniendo en cuenta estos resultados es de esperarse la disminución de oxígeno e hidrógeno en la composición elemental del carbonizado; ya que durante la carbonización la materia prima elimina compuestos volátiles, con contenidos de O e H. De la misma forma el contenido de materia volátil (MV) se hace menor con el incremento en la temperatura de proceso mientras que el porcentaje de carbono fijo (CF) aumenta.

Figura 11. Carbonización de cuesco de palma a diferentes temperaturas

		Temperatura de pirólisis		
		300 °C	400 °C	500 °C
Análisis elemental (% masa daf)	C	77,83	78,49	81,15
	H	4,87	4,31	3,69
	O	16,55	16,56	14,44
	N	0,75	0,64	0,72
	O/C	0,16	0,13	0,10
	H/C	0,75	0,64	0,55
Análisis próximo (% masa)	MV	40,59	35,10	28,15
	CF	57,10	62,05	68,48
	Cenizas	2,31	2,85	3,37
Poder calorífico	MJ/kg	29,60	30,59	31,14

Fuente: ROMERO, Lina. CRUZ, María. SIERRA, Fabio. Efecto de la Temperatura en el potencial de aprovechamiento energético de los productos de la pirólisis del cuesco de palma. Universidad Francisco José de Caldas. Bogota.2016.

²² ROMERO, Lina. CRUZ, María. SIERRA, Fabio. Efecto de la Temperatura en el potencial de aprovechamiento energético de los productos de la pirólisis del cuesco de palma. Universidad Francisco José de Caldas. Bogota.2016.

Barraza y rojas²³, en su artículo “Caracterización morfológica del carbonizado de carbones pulverizados: determinación experimental” definen que el tiempo de residencia y la temperatura determinan el tipo de carbonizado que se va a producir, carbonizados tipo sólido a altas temperaturas y largos tiempos de desvolatilización, a cortos tiempos y bajas temperaturas se producen carbonizados de pared delgada. Varriano, Gil, Cozzarin²⁴, realizaron ensayos para determinar la influencia de la temperatura y el tiempo de residencia en las características del producto y los rendimientos del proceso (ver figura 12). Con lo que se pudo determinar el impacto que causa la temperatura y el tiempo en la producción del carbón activado, se observa que con el aumento del tiempo se incrementan las pérdidas de peso lo mismo pasa con el aumento de la temperatura. Sin embargo, es de gran importancia tener en cuenta no exceder los tiempos ni las temperaturas límites debido a que se puede ocasionar fractura o la quema total del material.

Figura 12. Influencia de la Temperatura y Tiempo de Residencia en rendimiento y características del producto

N° de muestra	Peso Inicial (grs.)	Temp. de Activación (°C)	Tiempo de Activación (min.)	Peso Final (grs.)	Rendimiento	Iy
1	58.3	600	30	9.97	17.1%	475
	58.6	600	45	9.37	16%	478
3	58	600	60	9.28	16%	652
4	58.2	650	30	9.9	17%	890
5	59	650	45	8.85	15%	1020*
6	58.7	650	60	9.4	16%	910
7	58.9	700	30	9.4	16%	781
8	58.2	700	45	6.92	12%	-
9	58.1	700	60	5.82	10.0%	-

Fuente: VARRIANO, Nicolás. GIL, Marcelo. COZZARIN, Raúl. Producción sustentable de carbón activado a partir de caña de bambú. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata. Argentina.

Durante la producción de carbón activado, es de gran importancia conocer el ciclo térmico (definido por el tiempo y la temperatura) que tiene el material precursor en este caso el cuesco de palma, de acuerdo con este se determinan los parámetros de las pérdidas de masa y la estructura inicial posea será definitoria en la microestructura de sus carbones activados. En el desarrollo de este trabajo se considera

²³ ROJAS, Andrés. BARRAZA, Juan. Caracterización morfológica del carbonizado de carbones pulverizados: determinación experimental. Universidad Nacional sede Palmira. Universidad del Valle. Cali. 2007.

²⁴ VARRIANO, Nicolás. GIL, Marcelo. COZZARIN, Raúl. Producción sustentable de carbón activado a partir de caña de bambú. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata. Argentina.

la influencia de la temperatura y el tiempo de residencia en las dos etapas fundamentales del proceso de producción de carbón activado:

3.2.1 Fase de Carbonización. Es de gran importancia el control de la temperatura y el tiempo de residencia para esta fase del proceso pues en la carbonización el material sufre una descomposición térmica. Si durante el proceso la temperatura no alcanza la requerida, la materia prima no elimina el contenido de materia volátil por lo que impide el desarrollo inicial de la porosidad y además ocasionaría contaminación en el proceso de activación, produciendo un carbonizado de baja calidad. Por el contrario, si la temperatura de la fase de carbonización es muy elevada con respecto al límite para que se inicie la descomposición térmica entonces la materia prima será desintegrada y totalmente quemada. Sin duda es importante tener control del tiempo en que la materia prima está a estas condiciones de temperatura, debido a que si este sobrepasa el requerido la materia prima sufrirá de igual manera fractura y desintegración total.

3.2.2 Fase de Activación. Durante el proceso de activación se mejoran las propiedades de adsorción del carbonizado esto a través de la interacción de las moléculas de gases combustibles con los residuos de alquitranes que están depositados en los poros y superficie del material. Durante este procedimiento es importante saber el tiempo que se va a someter el carbonizado a contacto con los gases combustibles ya que si el tiempo se excede, se originan más reacciones oxidativas y a su vez los diámetros de poro aumentan tanto, que el material excede su porosidad y pierde las propiedades adsorbentes al quebrarse, además, la temperatura a la que se va a realizar la activación ya que de esta dependen las propiedades de porosidad y área superficial del producto final, a medida que se aumenta la temperatura el rendimiento másico disminuye.

3.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DEL TIEMPO DE RESIDENCIA Y LA TEMPERATURA

El proceso de producción de carbón activado se divide principalmente en dos etapas: la carbonización y la activación. Como se mencionó anteriormente, para cada una de las etapas se considera como variable crítica de operación la temperatura y el tiempo de residencia. Se proponen dos desarrollos experimentales para conocer la influencia de las variables en la etapa de carbonización y la activación, pues, aunque para las dos etapas del proceso las variables críticas son las mismas sus valores son diferentes y la influencia en las características del producto también, teniendo en cuenta la fase del proceso en la que está trabajando.

3.3.1 Experimentación en la carbonización. Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica y los ensayos realizados en la empresa industrias Tecsol, se establece el rango de temperaturas para la carbonización entre 400°C – 600°C con el fin de eliminar el contenido de humedad y materia volátil para producir un carbonizado

uniforme con elevado contenido de carbono fijo. En este intervalo de temperatura se desarrolla la desvolatilización térmica de la materia prima; si se utiliza una temperatura menor para la carbonización el material no alcanza la energía suficiente para que la estructura se divida en más pequeñas y se libere como material volátil; si la temperatura excede el valor se generan menores rendimientos máxicos y hay riesgo de que el material se queme totalmente.

Para determinar la influencia de las variables críticas en el carbonizado se calcula el porcentaje de carbono fijo como variable de respuesta. “El carbono fijo del carbón activado, que representa al carbono elemental, tiene un grado de pureza variado en su fórmula química pues en todos los casos siempre se encuentra asociado o en su superficie a pequeñas cantidades de oxígeno e hidrógeno formando grupos funcionales de tipo carboxilo, carbonilo, fenoles y otros derivados químicos. Estos componentes permanecen en la estructura del carbón activado como consecuencia de una mala carbonización.”²⁵ Entre mayor sea el contenido de carbono fijo en la estructura del carbonizado, se considera de mejor calidad debido a que el material volátil compuesto principalmente por átomos de hidrogeno (H) y oxigeno (O) se elimina efectivamente, al eliminar todo su contenido de humedad y materia volátil queda con bajos contenidos de cenizas y elevado contenido de carbono fijo.

El porcentaje de carbono fijo del carbonizado se analiza con el equipo TGA siguiendo lo establecido en la norma ASTM D3172, el procedimiento es el mismo que para la determinación de carbono fijo en la caracterización de la materia prima, se omite la humedad y contenido volátil pues ya fue eliminado. El porcentaje de cenizas y carbono fijo se determinan con la ecuación 3 y 4 respectivamente, citadas en el capítulo 1 para los análisis próximos del cuesco de palma.

Para determinar la influencia de las variables críticas en la carbonización se realizaron seis pruebas de carbonización utilizando 50 kg de cuesco de palma con diámetro de partícula de 6mm, modificando los valores de tiempo y temperatura. Se seleccionaron dos tiempos de residencia 60 min y 90 min, teniendo en cuenta el diseño de los hornos, el ángulo de inclinación y la velocidad de giro; con 3 valores de temperatura 400°C, 500°C y 600°C, teniendo en cuenta el intervalo anteriormente fijado.

Después de que el cuesco es carbonizado a diferentes condiciones se toma una muestra de cada carbonizado se muele y tamiza, de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM D3172 la muestra debe ser <0,250mm para posteriormente realizar el análisis termogravimétrico. En la tabla 10 se muestran los resultados obtenidos del porcentaje de carbono fijo para cada muestra analizada en el equipo TGA.

²⁵ GONZALEZ, Héctor. TERUYA, Renzo. Estudio preliminar de carbón activado; situación en el Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. 2004.

Tabla 10. Porcentaje carbono fijo del carbonizado (%CF)

		%CF		
		400	500	600
Tiempo (min)	Temperatura (°C)			
	60	74,79	84,26	88,56
90		84,98	92,14	80,83

De acuerdo con los resultados de la tabla 10 se aprecia que los carbonizados con más alto porcentaje de carbono fijo fueron: 92,14% (500°C - 90 min) y 88,56% (600-60min) respectivamente, pues a estas temperaturas la estructura del cuesco de palma logra eliminar con mayor efectividad el contenido volátil por las condiciones del proceso y por esto su elevado contenido de carbono fijo.

El análisis termogravimétrico de cada muestra se lleva a cabo en el equipo TGA tomando una muestra de 1g de carbonizado anteriormente tratado según lo indica la norma. Primero en una atmosfera inerte utilizando nitrógeno (N₂), la muestra se calienta desde la temperatura ambiente hasta llegar a 700°C este valor de temperatura se obtiene en el minuto 120, luego se continua el calentamiento en presencia de oxígeno (O) hasta que el material se queme en su totalidad y la masa se mantenga constante, esto ocurrió entre 800°C y 900°C; el ensayo tuvo un tiempo de duración de 3 horas.

El incremento de la temperatura con respecto al tiempo tuvo un comportamiento similar en todos los análisis teniendo en cuenta que el equipo está diseñado para tener un incremento de aproximadamente 2°C cada 30 segundos, se pueden presentar algunas variaciones dependiendo del comportamiento de la muestra. La ecuación de la recta que determina el valor de la temperatura con respecto al tiempo para los análisis de determinación de carbono fijo realizados en el equipo TGA está determinada por:

Ecuación 5. Temperatura en el análisis TGA

$$T = 5,6811(t) + 16,684$$

Donde:

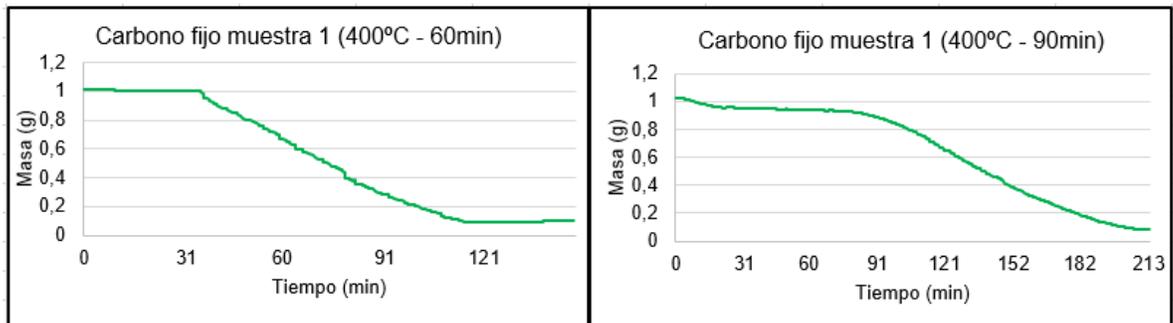
T: temperatura en °C

t: tiempo en min.

Se determina la linealidad del comportamiento de la temperatura a través del tiempo con el valor de $R^2 = 0,9969$

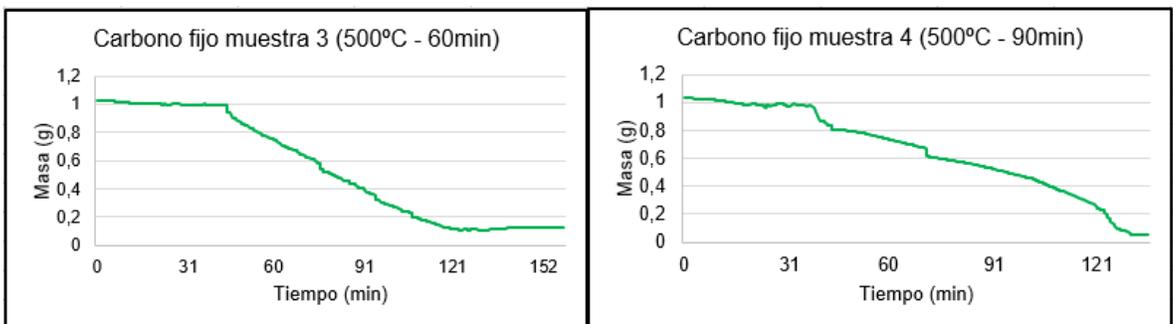
A continuación, se presentan las gráficas del comportamiento de la muestra a medida que pasa el tiempo de acuerdo a los resultados del análisis de TGA para la determinación de carbono fijo presente en cada muestra carbonizada. Durante el análisis termogravimétrico de las muestras la masa pasa 3 etapas principales que son: la eliminación de humedad, descomposición térmica de la estructura para liberar material volátil y determinación del contenido de cenizas en la cual el material se quema en su totalidad.

Grafica 3. TGA muestras carbonizadas a 400°C



En la gráfica 4 para la muestra 1 se aprecia como la masa de la muestra disminuye en la fase de eliminación de contenido volátil del material y presenta poca eliminación del material cuando se inició la quema del material (700°C – 120min). Por el contrario, la muestra 2 tiene bajo contenido de material volátil pues la masa de la muestra se mantiene constante a medida que pasa el tiempo e incrementa la temperatura. Desde el minuto 90 hasta 120 (500°C-700°C) se genera descomposición térmica y eliminación del material volátil, la siguiente disminución de la masa del material viene dada por la ignición de la muestra para determinar del contenido de cenizas en el material y carbono fijo.

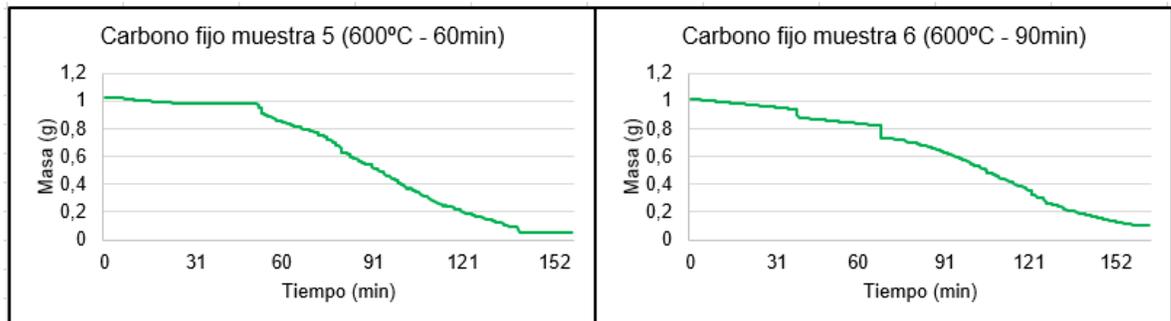
Grafica 4. TGA muestras carbonizadas a 500°C



En la gráfica 5 se observa el comportamiento de la masa con respecto al tiempo para la muestra carbonizada a 500°C con 60 y 90 min respectivamente, se aprecia

una diferencia en la pendiente de la recta en la zona de eliminación de material volátil que se presenta hasta el minuto 120, de acuerdo con la gráfica, la muestra 3 presenta mayor contenido de material volátil respecto a la muestra 4 debido al cambio de masa que presenta la muestra hasta los 700°C, además se aprecia bajo contenido de cenizas para ambas muestras pues el material al final del ensayo presenta poca disminución y variación de la masa de la muestra quemada.

Gráfica 5. TGA muestras carbonizadas a 600°C



En la gráfica 6 se aprecia la diferencia de eliminación de material volátil entre la muestra 5 y 6 carbonizadas a 600°C con 60 y 90 min de tiempo de residencia, de acuerdo con la gráfica la muestra 5 presentaba mayor contenido de material volátil por lo que a en esta etapa del proceso la masa de la muestra disminuyó considerablemente. En general, para todas las gráficas anteriores de resultados se puede observar que la masa de cada muestra en el inicio del análisis con el TGA se mantiene constante hasta el minuto 30 donde la temperatura es de 250°C, esto es a causa de la eliminación de la humedad durante el proceso de carbonización que va aproximadamente $100 \pm 10^\circ\text{C}$. Además, se puede apreciar en las gráficas que cuando la muestra se somete a mayor tiempo de carbonización (90min), se genera menor eliminación de material volátil en el análisis TGA a causa que durante la carbonización este ya se había excluido.

Se calculó el rendimiento másico de cada carbonización (tabla 11) con el fin de conocer a que condiciones se generan mejores rendimientos para una producción continua de CA a escala industrial. Se calcula de acuerdo a la cantidad de masa alimentada respecto a la masa de carbonizado que se produjo.

Tabla 11. Rendimiento másico de la carbonización de cuesco de palma

Rendimiento de Carbonización					
Muestra	Masa Alimentada (kg)	Temperatura (°C)	Tiempo R. (Min)	Masa Carbonizada (g)	Rendimiento (%)
1	50	400	60	19	38
2	50	400	60	18	36
3	50	500	60	18	36
4	50	500	60	17	34
5	50	600	60	14	28
6	50	600	60	13	26

En la tabla 11 se observa que entre mayor sea el tiempo de residencia se va a eliminar mayor cantidad de contenido volátil y a su vez se produce menos masa carbonizada. Con el aumento de la temperatura la cantidad de masa carbonizada disminuye por causa de una mayor eliminación del material volátil contenido, es importante tener en cuenta que si la temperatura es muy elevada y el tiempo de residencia dentro del horno es alto puede ocasionarse además la quema del material y también puede ser una causa de la disminución del rendimiento de la masa en el proceso de carbonización.

Se establece como temperatura óptima para la carbonización 500°C con un tiempo de residencia de 90min, teniendo en cuenta el porcentaje de carbono fijo del carbonizado (Tabla 10) y el rendimiento másico del cuesco (Tabla 11), a pesar de que a 600°C y 60 min se produce un carbonizado con elevado contenido de carbono, se observa que su rendimiento másico es bajo con respecto a las demás carbonizaciones lo cual no resulta conveniente a una producción continua, esto es por la elevada temperatura que ocasiona que la estructura sólida del carbonizado se queme y se genere menos masa en la carbonización.

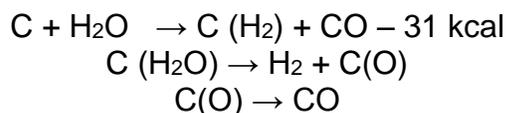
3.3.2 Experimentación en la Activación. La activación tiene como fin limpiar los poros del carbonizado por procesos sucesivos de oxidación y destilación de tal modo que se eliminan los productos volátiles a temperaturas menores que la de su temperatura de ebullición. Además, se generan nuevos poros en el material sólido por oxidación de los átomos de carbono de la estructura del material, sobre diferentes zonas de la superficie expuesta a la acción del agente de activante.

El área superficial de un carbón activado está definida por el número y tamaño de los poros que este contenga en su superficie sólida, como se mencionó anteriormente durante la activación se limpian, agrandan y generan nuevos poros con el fin de incrementar el área superficial y mejorar las propiedades adsorbentes del material. “Hay que señalar una coincidencia afortunada que consiste en que el

número de yodo, que se expresa en mg/g -miligramos de yodo adsorbidos por gramo de carbón activado- tiene un valor aproximadamente igual al área superficial obtenida por el método BET de adsorción de N₂, expresada en m²/g.”²⁶

Para determinar la temperatura y el tiempo de residencia que proporciona un carbón activado con mayor área superficial se establece como parámetro de medida la determinación de índices de yodo teniendo en cuenta las variables de operación del proceso. El número de yodo es un índice del área superficial de un carbón activado, se define como los miligramos de yodo adsorbidos por gramo de carbón activado. Esto se debe a que el yodo se absorbe con mucha eficiencia en una capa monomolecular y su tamaño le permite alojarse hasta en los poros más pequeños en los que se lleva a cabo la adsorción. Es por esto que la cantidad de yodo adsorbido es proporcional al área del carbón. La determinación de índice de yodo para las muestras de carbón activado producido, se desarrolla de acuerdo con la norma NTC 4467 “Productos químicos industriales. Métodos de ensayo”.

Se produjo carbonizado a 500°C con 90 min de tiempo de residencia del cual se obtuvo la mejor calidad de carbonizado por su porcentaje de carbono fijo y rendimiento. Se toman seis muestras de 50kg de carbonizado para activar a diferentes condiciones de temperatura entre los 700°C y 900°C; y tiempo de residencia de 60 min y 90 min. Durante la producción de carbón activado también se tuvo en cuenta la variable de flujo de agente activante dentro del horno, esta variable es influyente en la activación del CA debido a que, si existe mayor tránsito de iones oxidantes en el ambiente, los poros y superficie del carbón activado van a ser más reactivos y se van a liberar los poros con mayor facilidad. Se utiliza como agente activante vapor de agua para conocer su influencia sobre las características del producto final, se varían los flujos de alimentación al horno de activación (50mL/min y 100mL/min). El agente activante propicia las reacciones oxidativas en el ambiente del horno para crear nuevos poros, la reacción básica del carbón con vapor de agua es endotérmica representada por las siguientes reacciones:



Para determinar el índice de yodo de las muestras se toma una muestra de cada carbón activado producido, luego se muele y se tamiza para que la muestra pase por la malla 325 como lo indica la NTC 4467. En el análisis se utilizan los siguientes reactivos para la preparación de las respectivas soluciones como se indica en la norma:

- Agua destilada.

²⁶ RAMIREZ, Christian. Carbón activado para el tratamiento del agua. Universidad de Sonora. México. 2009.

- Ácido clorhídrico (5% en peso).
- Yoduro de potasio.
- Yodato de potasio.
- Tiosulfato de sodio 0,1N.
- Carbonato de sodio.
- Almidón.

Se pesan 0.65 g de la muestra tamizada y se pone en contacto con una solución de yodo 0.1 N, se agita y filtra. De la solución filtrada se toman 25 ml y se titularon con tiosulfato de potasio 0.1 N, en seguida se agrega 1 ml de solución de almidón y se vuelve a titular. Se mide la cantidad de tiosulfato de sodio empleado en las titulaciones. A continuación, se calcula la normalidad del filtrado, y se corrige, teniendo en cuenta la tabla “factor de corrección de yodo” tabulada en la norma y se calcula el índice de yodo para la muestra analizada.

Tabla 12. Índice de yodo para las muestras de carbón activado

Muestra	Masa de Carbonizada alimentada (kg)	Flujo H ₂ O _(g) (mL/min)	Temperatura (°C)	Tiempo R. (min)	Índice de yodo (mg yodo/mg CA)
1	50		700	60	734,2
2	50		700	90	802,9
3	50	50	800	60	876,4
4	50		800	90	903,4
5	50		900	60	1005,1
6	50		900	90	997,3
7	50		700	60	812,5
8	50		700	90	847,2
9	50		800	60	834,6
10	50	100	800	90	834,6
11	50		900	60	1082,3
12	50		900	90	1152,7

Se establece el agente activante, en este caso vapor de agua, como variable influyente en la fase de activación; en la tabla 12 los índices de yodo fueron más altos para las activaciones con flujo de 100mL/min, esto quiere decir que se genera un carbón activado con mayor área superficial comparado con el flujo de 50mL/min. Esto a causa del efecto oxidativo que causa en el ambiente del horno. Se observa que los mejores carbones activados producidos de acuerdo al índice de yodo que es proporcional al área superficial fueron la muestra 11 con 1082 mg/mg CA; la muestra 12 con 1022,3 mg/mg CA y la muestra 5 con 1005,08 mg/mg CA. En la caracterización de índices de yodo el flujo de agente activante influye en la mejora de las características de área superficial con el aumento de la temperatura y del

tiempo de residencia, de tal modo que si el material se somete por más tiempo a las condiciones de operación del horno se generan más reacciones oxidativas en el proceso de activación, factor que es beneficioso pues se crea una mayor porosidad en el material. Sin embargo, se debe tener precaución pues esto afecta los rendimientos másicos en la activación, y si se somete a estas condiciones por un tiempo excesivo puede sufrir fractura por exceso de porosidad.

Como parámetro para selección de las mejores condiciones para la activación de carbón activado a escala industrial, también se tiene en cuenta el rendimiento másico del proceso pues durante la activación se busca limpiar e incrementar los tamaños y número de poros sin incidir significativamente en la masa del carbón activado producido. A continuación, en la tabla 13 se presentan los rendimientos másicos de la fase de activación.

Tabla 13. Rendimiento másico de la activación calculados a partir de la masa de carbonizado alimentada al horno con respecto a la masa de carbón activado producido

Muestra	Masa de Carbonizada alimentada (kg)	Flujo H ₂ O(g) (mL/min)	Temperatura (°C)	Tiempo R. (min)	Masa Carbonizada (g)	Rendimiento (%)
1	50		700	60	28	56
2	50		700	90	27	54
3	50	50	800	60	27	54
4	50		800	90	25	50
5	50		900	60	25	50
6	50		900	90	23	46
7	50		700	60	26	52
8	50		700	90	27	54
9	50		800	60	26	52
10	50		800	90	24	48
11	50		900	60	23	46
12	50		900	90	21	42

En la tabla 13 el rendimiento másico del carbón activado producido se ve influenciado principalmente por las variables de temperatura y el flujo del agente activante; a mayor temperatura y mayor flujo, el rendimiento másico del carbón activado disminuye debido a que estas condiciones facilitan la eliminación de impurezas dentro de los poros generados en la carbonización y se desprenden las partes más reactivas de la estructura del carbonizado en forma de monóxido o dióxido de carbono, lo que ocasiona la disminución de la masa del CA que se produce. El tiempo también es un factor influyente pues permite que el material se

someta por mayor tiempo a las condiciones del horno y permite que se generen más reacciones oxidativas y descomposición de los poros y el carbonizado.

Se establece 900°C, 100 mL/min y 60 - 90 min como las mejores condiciones de activación para la generación de un carbón activado de buena calidad, teniendo en cuenta el análisis de índice de yodo de las muestras de CA producido (tabla 12) y los rendimientos de la fase de activación (tabla 13). La selección de las condiciones de operación para la fase de activación se hace teniendo en cuenta los índices de yodo que describe el área superficial del carbón activado, y a su vez, la capacidad de adsorción de este pues a mayor área superficial el CA tiene mejores propiedades de adsorción, el rendimiento másico del producto es importante para una producción a escala industrial.

De acuerdo a los análisis desarrollados para la caracterización del carbonizado y carbón activado se definen las variables más favorables para la fase de carbonización (tabla 14) y activación (tabla 15) en la producción de carbón activado a partir de cuesco de palma en la empresa Industrias Tecsol Ltda., presentadas a continuación:

Tabla 14. Condiciones de operación para la carbonización

Temperatura (°C)	Tiempo de residencia (min)
500	90

Tabla 15. Condiciones de operación para la activación

Temperatura (°C)	Tiempo de residencia (min)	Flujo de agente activante (mL/min)
900	90	100

Teniendo en cuenta los análisis de las muestras producidas tanto de carbonizados como de carbón activado, se establece la influencia de las variables del proceso con las características del producto y de este modo conocer las condiciones apropiadas para producir un producto de calidad. En la tabla 14 y 15 se definen las variables de operación para la producción de carbonizado y carbón activado respectivamente, estas variables se determinan como las más apropiadas de acuerdo a los resultados obtenidos en la determinación de porcentaje carbono fijo para los carbonizados producidos y el índice de yodo para el carbón activado.

Durante la producción de carbón activado la calidad del producto final depende del tipo de precursor que se utilice según sus propiedades fisicoquímicas, métodos de

activación ya sea física o químicamente y las variables del proceso que como se observa a lo largo del capítulo influyen sobre las propiedades del carbonizado y carbón activado. Es de gran importancia controlar las variables del proceso para la producción de carbón activado pues influyen sobre las características y calidad del producto generado, durante la fase de carbonización la temperatura y tiempo de residencia influyen sobre el porcentaje de carbono fijo y el rendimiento másico del carbonizado; en la fase de activación las variables críticas son: la temperatura, tiempo de residencia y flujo de agente activante e influyen sobre el área superficial y porosidad del carbón activado producido y a su vez sobre las propiedades de adsorción del producto. Teniendo en cuenta los análisis realizados a lo largo del capítulo se establecen las variables de operación para la producción continua de carbón activado en la planta de Industrias Tecsol Ltda., y generar un producto con características uniformes a escala industrial.

4. DETERMINAR LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CUESCO DE PALMA

En este capítulo se evalúa la eficiencia del proceso de producción de carbón activado en la planta de Industrias Tecsol Ltda. teniendo en cuenta los análisis realizados previamente para el diseño y construcción de los equipos; además determinando balances de masa y energía del proceso en la planta y de este modo conocer si los rendimientos se ajustan a las necesidades de producción del carbón activado que se va a comercializar.

4.1 EFICIENCIA DE LA CARBONIZACION EN LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

Durante la carbonización se genera descomposición térmica del cuesco de palma, el rendimiento másico varía de acuerdo a los cambios de temperatura y tiempo de residencia del proceso, el rendimiento másico de la fase de carbonización para la producción de carbón activado a partir de cuesco de palma se muestra en la tabla 11 del capítulo anterior. “A 300 °C predomina el subproducto sólido con un 50 % de la masa inicial de biomasa pirolizada, mientras que el gas y el líquido corresponden a un 18 % y un 32 %, respectivamente. Con una temperatura de pirólisis de 500 °C la producción de material sólido disminuye hasta un 33 %, mientras que el producto líquido predomina, llegando hasta un 43 %. En general el porcentaje de producción de gas se mantiene entre 18 % y 24 % para el rango de temperaturas estudiado.”²⁷

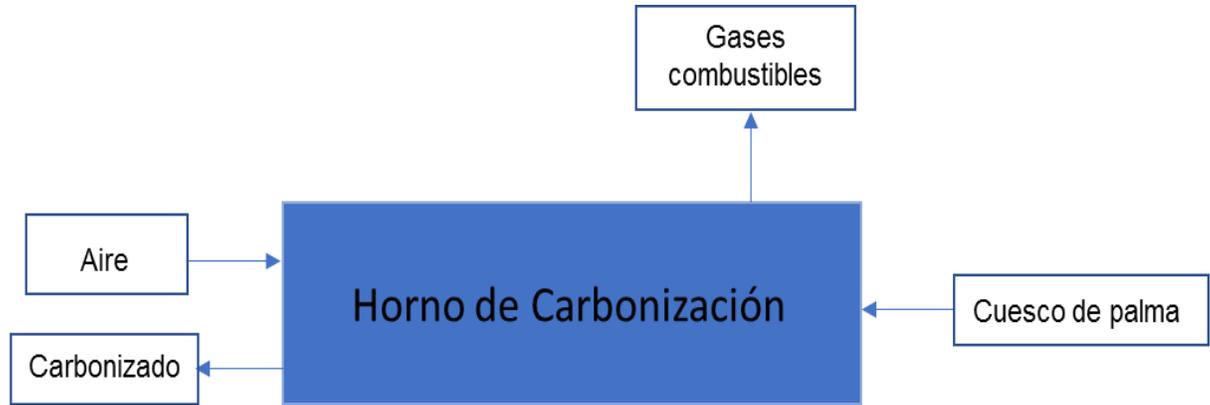
Como se mencionó en el capítulo anterior los gases volátiles producto de la descomposición térmica en la carbonización se queman para aprovechar el potencial energético en la fase de activación, por lo que en el balance de masa no se tiene en cuenta un subproducto líquido ya que no hay condensación de gases para ser separados como alquitranes del proceso sino que estos alquitranes en estado gaseoso pasan inmediatamente a la cámara de combustión para ser quemados y aprovechar su potencial energético en el horno de activación.

4.1.1 Balance de masa de la carbonización. Para establecer el balance de masa global para el horno de carbonización se tuvieron en cuenta las corrientes másicas de: cuesco de palma alimentado, porción de aire utilizada en el quemador, masa de carbonizado y la cantidad de gases combustibles que se generan por la descomposición térmica del cuesco de palma. Además, se toma como base de cálculo 1 hora para el horno de carbonización teniendo en cuenta que la planta va a tener una producción continua; se selecciona este tiempo teniendo en cuenta la duración de la fase una carbonización, desde que ingresa el cuesco de palma, hasta

²⁷ ROMERO, Lina. CRUZ, María. SIERRA, Fabio. Efecto de la Temperatura en el potencial de aprovechamiento energético de los productos de la pirolisis del cuesco de palma. Universidad Francisco José de Caldas. Bogota.2016.

que sale todo el carbonizado producido. A continuación, en la figura 13, se presenta el balance de masa global para el horno de carbonización.

Figura 13. Diagrama de balance de masa en el horno de Carbonización.



Se tiene en cuenta las corrientes másicas de entrada y salida del horno de carbonización de acuerdo con la siguiente ecuación:

Ecuación 6. Balance de masa horno carbonización.

$$m(\text{Cuesco}) + m(\text{Aire}) = m(\text{Carbonizado}) + m(\text{Gases combustibles})$$

Donde:

- M(cuesco): fue la cantidad en masa de cuesco que se alimentó al iniciar el proceso, en este caso se utilizaron 50 Kg.
- M(aire): La entrada de aire se da por medio de un quemador ubicado en el extremo del horno opuesto a la zona de alimentación, el cual tiene la posibilidad de regular el flujo másico por medio de unas rejillas que posee en su interior, además de darle turbulencia antes de entrar a la cámara de combustión. Se utilizan 12,4 kg de aire para el proceso de carbonización²⁸, su determinación se hizo a partir del balance elemental de la cantidad de nitrógeno que contenía el cuesco con la cantidad de nitrógeno que sale en el gas volátil, la diferencia es la cantidad de nitrógeno que ingresa al horno a través del aire.
- M(carbonizado): el rendimiento de las carbonizaciones fue en promedio de 34% de acuerdo con la masa alimentada fue de 17kg la cantidad de carbonizado producido.

²⁸ TECSOL. Construcción de una planta piloto para producir carbón activado a partir de cuesco de palma. Bogotá. 2011.

- M (gases combustibles): la masa de los gases combustibles se conforma de los gases volátiles y masa de alquitranes, se determinada por diferencia en el balance de masa global teniendo en cuenta el rendimiento másico en la carbonización calculado por Tecsol en el diseño de los hornos, donde establece que 17 % para Gas y un 49% bioaceite o alquitranes (fase gaseosa), 14,2 Kg y 31,2 Kg respecto a la masa de cuesco ingresado al horno.

Como resultado del proceso de carbonización el cuesco de palma sufre descomposición térmica generando tres subproductos como se indica en el informe técnico de mejoramiento de planta piloto de carbón activado de Tecsol para explotación comercial²⁹, los rendimientos estimados son 34 % para carbonizado, 17 % para Gas y un 49 % bioaceite o alquitranes respecto a la masa alimentada de cuesco. La composición típica de los gases volátiles y los alquitranes, generados en la pirolisis de materiales lignocelulósicos, se muestra en la tabla 15 y 16, respectivamente.

Tabla 16. Composición gases volátiles

Compuesto	% Volumen
CO ₂	13,2
CO	16,3
H ₂	7,9
N ₂	48,4
O ₂ en Hidrocarburos	14,2
Total	100

Fuente: LESME, R. 2009. Citado por: TECSOL Ltda. Mejoramiento de la planta piloto de carbón activado de Tecsol para explotación comercial. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.2016.

Tabla 17. Composición de alquitranes

Propiedad	% Volumen
pH	2,5
C	55,3-63,5
H	5,2-7
N	0,07-0,39
S	0,00-0,05
O (por diferencia)	39,4-28,9
Ceniza	0,004-0,25

LESME, R. 2009. Citado por: TECSOL Ltda. Mejoramiento de la planta piloto de carbón activado de Tecsol para explotación comercial. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.2016.

²⁹ TECSOL Ltda. Mejoramiento de la planta piloto de carbón activado de Tecsol para explotación comercial. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.2016

Sin embargo, no hay condensación de los alquitranes y estos pasan a la cámara de combustión donde son quemados mejorando la eficiencia térmica del proceso de activación. Los gases combustibles se componen de los gases volátiles y los alquitranes, “los alquitranes están compuestos de Moléculas inorgánicas en forma de gases y líquidos tales como benceno, tolueno, fenol y Naftalina. Los productos sólidos restantes procedentes de la pirólisis son carbonizados”³⁰. Teniendo en cuenta las variables del proceso ya mencionadas se establece el balance de masa para el horno de carbonización:

Tabla 18. Balance de masa en el horno de carbonización

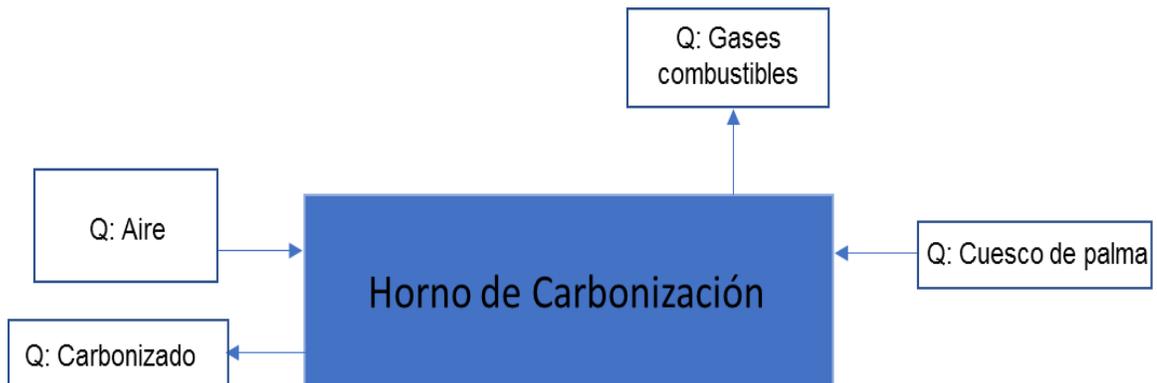
Corriente	\dot{m} (kg/h)		%Entrada	%Salida
	Entrada	Salida		
Cuesco	50	N/A	80,13%	N/A
Aire	12,4	N/A	19,87%	N/A
Bioaceite	N/A	31,2	N/A	50,00%
Carbonizado	N/A	17	N/A	27,24%
Gas volátil	N/A	14,2	N/A	22,76%
Totales	62,4	62,4	100.00%	100,00%

Teniendo en cuenta los rendimientos fijados para la producción de carbonizado en el horno y de acuerdo a los resultados de la tabla 18 del balance de masa se concluye que la producción del carbonizado bajo las condiciones que opera el horno cumple con los rendimientos teóricos planteados anteriormente y además se ajustan a las necesidades para la producción continua de CA a escala industrial.

4.1.2 Balance de energía de la carbonización. Se determina el balance de energía para el horno de carbonización con el fin de establecer la energía necesaria para el calentamiento y llevar a cabo la descomposición térmica del cuesco de palma utilizado. Se calcula la energía aportada y liberada por cada corriente del horno y las pérdidas de energía se calculan por diferencia. A continuación, se presenta el balance global de energía para el horno:

³⁰ SOUZA-SANTOS, M. L. D. 2004. Solid Fuels Combustion and Gasification : Modeling, Simulation, and Equipment Operation. Marcel Dekker, New York, USA. Citado por: PILON, Guillaume. Utilization of arecanut (Areca catechu) husk for gasification. Montreal. 2007

Figura 14. Balance de energía horno de carbonización



La ecuación 7 define el balance de energía del horno teniendo en cuenta las corrientes de entrada cuesco y aire; y las corrientes de salida que se compone de los gases combustibles y el producto carbonizado.

Ecuación 7. Balance de energía horno de carbonización

$$Q(\text{cuesco}) + Q(\text{aire}) = Q(\text{carbonizado}) + Q(\text{gases combustibles}) + Q(\text{perdidas})$$

La determinación del calor para cada corriente del balance de energía en el horno se calcula mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 8. Flujo de calor.

$$\dot{Q} = \dot{m} * C_p * (T_f - T_i) + \dot{m} * P_c$$

Donde:

\dot{m} : Flujo másico [kg/h]

C_p : Calor específico [$kcal/kg^{\circ}C$]

T_f : Temperatura final [$^{\circ}C$]

T_i : Temperatura inicial [$^{\circ}C$]

P_c : Poder calorífico [$kcal/kg$]

A continuación, en la tabla se presentan los valores de C_p y P_c para cada corriente del horno de carbonización tomados en del informé técnico de Tecsol³¹, estos valores se tienen en cuenta para el cálculo de flujo de energía de cada corriente de acuerdo a la ecuación 8.

³¹ TECSOL. Informe técnico construcción de una planta piloto para producir carbón activado a partir de cuesco de palma. Bogotá. 2011.

Tabla 19. Calor específico y capacidad calorífica de las corrientes del horno de carbonización

Corriente	Cp (kcal/kg °C)	Pc (kcal/kg)
Cuesco	0,33	5258,12
Aire	1,005	0
Bioaceite	0,4	4780
Carbonizado	0,22	5975,12
Gas volátil	0,577	768,84

Fuente: TECSOL. Informe técnico construcción de una planta piloto para producir carbon activado a partir de cuesco de palma. Bogotá. 2011.

En la tabla 20 se muestran los deltas temperatura y los flujos másicos de las corrientes en el horno de carbonización, para determinar el calor generado por cada corriente de acuerdo a las variables del proceso utilizado en la fase de carbonización.

Tabla 20. Temperaturas y flujos másicos de las corrientes del horno de carbonización

Corriente	\dot{m} (kg/h)	ΔT (°C)
Cuesco	50	475
Aire	12,4	225
Bioaceite	31,2	225
Carbonizado	17	475
Gas volátil	14,2	225

El valor del delta de temperatura estimada para cada corriente de entrada y salida se estimó teniendo en cuenta el cambio que tuvo durante el proceso que se lleva a cabo en el horno, para el cuesco y carbonizado se calcula un cambio de temperatura de 475°C teniendo en cuenta que el material se lleva desde la temperatura ambiente y la carbonización se desarrolla a 500°C, para las demás corrientes el cambio de temperatura es menor ya que el bioaceite y alquitrán se generan durante la descomposición térmica del cuesco que empieza entre los 200- 400°C, de acuerdo con el análisis TGA que se desarrolló en el capítulo 2 a la materia prima.

De acuerdo a la ecuación 8 y con los valores de la tabla 19 y 20 respectivamente se calcula el flujo de energía para cada corriente en el horno de carbonización, los resultados del balance de energía se presentan a continuación:

Tabla 21. Balance de energía para el horno de carbonización.

Corriente	Q(kcal/h)		%Entrada	%Salida
	Entrada	salida		
Gas	2803,9	N/A	1,03%	N/A
Cuesco	270743,5	N/A	98,90%	N/A
Carbonizado	N/A	103353,5	N/A	37,78%
Gas volátil	N/A	12761,1	N/A	4,67%
Bioaceite	N/A	151944	N/A	55,55%
Pérdidas	N/A	5488,9	N/A	2,01%
Totales	273547,5	268058,6	100.00%	100,00%

Teniendo en cuenta los resultados del balance de energía del horno de carbonización se puede apreciar que la corriente de bioaceite (alquitranes) libera un porcentaje alto de energía 55,55%, lo que resulta favorable teniendo en cuenta que no hay condensación y se hace aprovechamiento energético de estos gases para la fase de la activación. Además, se generan pocas pérdidas de energía (2,01%) teniendo en cuenta que el horno opera a 500°C hay poca transferencia de calor entre las paredes del horno y el ambiente gracias al revestimiento de fibra de vidrio, lo que es oportuno para una producción continua e industrial.

4.2 EFICIENCIA DE LA ACTIVACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

El carbonizado producido es transportado a través de tornillos sin fin que conectan la zona de descargue del carbonizado con la tolva de almacenamiento que se encarga de alimentar el horno de activación. “La activación propiamente dicha se llevó a cabo inmediatamente después del proceso de carbonización y consistió en hacer reaccionar al agente activante (vapor) con los átomos de carbono del producto de la pirolisis que está siendo activado; de forma de producir un “quemado selectivo” que va horadado progresivamente al carbonizado, generando poros y aumentando la porosidad hasta transformarlo en un carbón activado.”³².

4.2.1 Balance de masa de la activación. Para el proceso de activación se tienen en cuenta: la masa de carbonizado que ingresa al horno, la cantidad de carbón activado que se produce, el flujo de agente activante en este caso se utilizó vapor de agua, la masa de los gases combustibles liberados en la fase de carbonización.

³² MATOS, Juan. Efecto catalítico de la composición química de biomasa sobre los parámetros cinéticos asociados a la síntesis de carbón activado. Asociación Interciencia. Venezuela.2010.

A continuación, se presenta el balance de masa del horno de carbonización, teniendo en cuenta los flujos másicos de cada corriente del horno.

Figura 15. Balance de masa horno de activación.



De acuerdo a la figura 16 se establece el balance de masa para el horno de activación teniendo en cuenta las corrientes de entrada y de salida:

Ecuación 9. Balance de masa horno de activación.

$$m(\text{carbonizado}) + m(\text{gas volatil}) + m(\text{bioaceite}) + m(\text{vapor de agua}) + m(\text{Aire}) = m(\text{gases volatiles}) + m(\text{carbon activado})$$

Donde:

- M (carbonizado): fue la cantidad en masa de carbonizado que se alimentó en el horno de activación al inicio del proceso es decir 50 Kg.
- M (Gases combustibles): se tiene en cuenta los flujos másicos de salida del horno de carbonización de los gases volátiles y los gases de bioaceite, es decir, 14,2 y 31,2 kg respectivamente.
- M (H₂O): El agua en el horno de activación es utilizado como agente activante del proceso se usa un flujo de 100ml/min, es decir, 6 Kg de agua en una hora que es el tiempo de residencia de la activación.
- M (Gases volátiles): es la cantidad de gas liberado después del proceso de activación en estos se incluyen dos clases de volátiles: los producidos por la combustión de los gases volátiles y alquitranes; y los generados por el proceso de gasificación del material carbonizado. La determinación de las corrientes de aire y humos de gasificación y combustión³³, se hicieron a partir del balance de masa entregado por Tecsol en el informe técnico, para la construcción de una planta piloto para producir carbón activado a partir de cuesco de palma.

³³ TECSOL. Informe técnico. Construcción de una planta piloto para producir carbón activado a partir de cuesco de palma. Bogotá. 2011.

En la tabla 23, de acuerdo con los flujos másicos de entrada y salida al horno de activación se determina el balance de masa:

Tabla 22. Balance de masa horno de activación

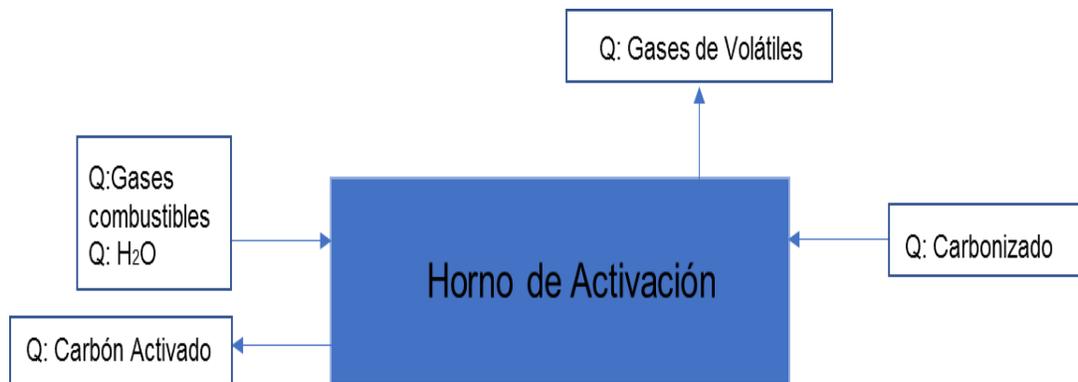
Corriente	(Kg/h)		% Entrada	% Salida
	Entrada	Salida		
Carbonizado	50	N/A	15,37%	N/A
Bioaceite	31,2	N/A	9,59%	N/A
Gas volátil	14,2	N/A	4,36%	N/A
Aire Combustión	26,3	N/A	8,09%	N/A
Aire Gasificación	197,7	N/A	60,75%	N/A
H2O	6	N/A	1,84%	N/A
Humos Combustión	N/A	71,7	N/A	22,04%
Humos Gasificación	N/A	211,7	N/A	65,06%
Carbón Activado	N/A	24	N/A	7,38%
Perdidas	N/A	18	N/A	5,52%
Totales	325,4	325,4	100,00%	100,00%

El rendimiento másico de carbón activado producido es cercano al 50% con respecto a la masa de carbonizado alimentado, es un resultado apropiado teniendo en cuenta los rendimientos teóricos establecidos por la empresa³⁴ para la producción de carbón activado a partir de cuesco de palma a escala industrial.

4.2.2 Balance de energía de la activación. Se determina el balance de energía para el horno de activación calculando el flujo de calor de cada una de las corrientes de salida y entrada al horno de activación, mediante la ecuación de flujo de calor. A continuación, se presenta el diagrama del horno de activación con sus respectivas corrientes para establecer el balance:

Figura 19. Diagrama balance de energía horno de Activación

³⁴ Ibid., p 68.



El flujo de calor (Q) para cada corriente en el horno de activación se calcula mediante con la ecuación 12 previamente citada para el balance de energía del horno de carbonización.

Ecuación 10. Flujo de calor

$$\dot{Q} = \dot{m} * C_p * (T_f - T_i) + \dot{m} * P_c$$

Donde:

\dot{m} : Flujo másico [kg/h]
 C_p : Calor específico [kcal/kg°C]
 T_f : Temperatura final [°C]
 T_i : Temperatura inicial [°C]
 P_c : Poder calorífico [kcal/kg]

La ecuación 11 define el balance de energía del horno de activación teniendo en cuenta cada corriente del horno, las pérdidas se calculan por diferencia teniendo en cuenta la energía aportada por las corrientes de entrada y salida.

Ecuación 11. Balance de energía en el horno de activación

$$Q(\text{Carbonizado}) + Q(\text{Gases combustibles}) + Q(\text{H}_2\text{O}) \\ = Q(\text{Carbon activado}) + Q(\text{Gases volatiles}) + Q(\text{perdidas})$$

A continuación, en la tabla se presentan las variables de cálculo (C_p , P_c , \dot{m} , ΔT) para determinar el flujo de energía de cada corriente en el horno de activación. Los valores de C_p y P_c para cada corriente del horno de carbonización tomados en del informe técnico de Tecsol³⁵, así mismo la determinación de la energía de la

³⁵ TECSOL. Informe técnico construcción de una planta piloto para producir carbon activado a partir de cuesco de palma. Bogotá. 2011.

reacción, y de los gases volátiles producto de la activación para cada corriente del horno:

Tabla 23. Determinación de Q para cada corriente en el horno de activación

Material	Cp (kcal/kg °C)	Pc (kcal/kg)	m (kg/h)	ΔT (°C)	Q (kcal/h)
Carbonizado	0,22	5975,1	50	400	303156
Bioaceite	0,4	4780	31,2	400	154128
Gas volátil	0,577	768,9	14,2	400	14194,9
Aire Combustión	1,005	0	26,3	400	10585,5
Aire Gasificación	1,005	0	197,7	400	79459,3
H2O	1	1	6	400	2406
Humos Combustión	0	0	71,7	400	84866,2
Humos Gasificación	0	0	211,7	400	127299,3
Carbón Activado	0,25	7170,2	24	400	174484,08
Energía de reacción	N/A	N/A	N/A		44335,6

De acuerdo con los resultados de la tabla 23 se establece el balance de energía para el horno de activación:

Tabla 24. Balance de energía para el horno de activación

Corriente	Q(kcal/h)		% Entrada	% Salida
	Entrada	Salida		
Carbonizado	303156	N/A	53,76%	N/A
Bioaceite	154128	N/A	27,33%	N/A
Gas volátil	14194,9	N/A	2,52%	N/A
Aire Combustión	10585,5	N/A	1,88%	N/A
Aire Gasificación	79459,3	N/A	14,09%	N/A
H2O	2406	N/A	0,43%	N/A
Humos Combustión	N/A	84866,2	N/A	15,05%
Humos Gasificación	N/A	127299,3	N/A	22,57%
Carbón Activado	N/A	174484,1	N/A	30,94%
E. reacción	N/A	44335,6	N/A	7,86%
Perdidas	N/A	132944,5	N/A	23,57%
Totales	563929,7	563929,7	100,00%	100,00%

Para este horno las pérdidas de calor son más elevadas producto de la alta temperatura a la que opera el horno (900°C) lo que genera una transferencia de

calor mayor entre las paredes del horno y el ambiente. Es importante hacer un aprovechamiento energético de las corrientes de gas de salida del horno de activación, pues como se aprecia en la tabla 24 la energía que se libera por estos a la salida es alta.

En el desarrollo de este capítulo se determina la eficiencia másica y energética del proceso de producción de carbón activado a partir de cuesco de palma y se aprecia que cumple con los parámetros establecidos por la empresa en el diseño de los hornos para una producción continua a escala industrial³⁶, además se presenta una buena eficiencia energética teniendo en cuenta las pocas pérdidas de energía que presenta el sistema, sin embargo en el horno de activación las pérdidas son mayores por lo que se sugiere hacer un mejoramiento del diseño o el uso de estos gases liberados con alto potencial energético en el aprovechamiento de un proceso dentro de la planta como puede ser en la fase de secado de la materia prima.

³⁶ Ibid., p 24.

5. CARACTERIZAR EL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO

Se determina la calidad de los carbones activados producidos con análisis de índices de yodo que permite estimar el valor del área superficial del carbón activado, índice de azul de metileno, este análisis proporciona una percepción de la presencia de macro y mesoporos con tamaños similares a la molécula de azul de metileno, isoterma de freundlich e isoterma de tiempo de contacto para determinar la capacidad de adsorción de los carbones activados producidos. Los análisis realizados se evaluaron de acuerdo a la NTC 4467 (Productos Químicos Industriales “CARBÓN ACTIVADO. MÉTODOS DE ENSAYO”).

5.1 ÍNDICE DE YODO

El índice de yodo se define como la cantidad en miligramos (mg) de yodo adsorbido por una muestra de 1 gramo de carbón activado. Este es un indicador del área superficial del carbón activado ya que el yodo se puede adsorber en una monocapa y por el tamaño de la molécula se alberga en los microporos, tiene un valor aproximadamente igual al del área superficial expresada en m²/g. “En general, los microporos le confieren la elevada superficie y capacidad de retención, mientras que los mesoporos y macroporos son necesarios para retener moléculas de gran tamaño, como pueden ser colorantes o coloides, y favorecer el acceso y la rápida difusión de las moléculas a la superficie interna del sólido”³⁷.

El ensayo se realizó teniendo en cuenta el procedimiento de la NTC 4467, primero se hizo adecuación de la muestra de carbón activado, molido y tamizado, se pone en contacto con una solución de yodo, se filtra y una alícuota de la solución remanente se valora con tiosulfato de sodio. La normalidad del filtrado residual se emplea para calcular los miligramos de yodo adsorbido. Para el cálculo del índice de yodo presente en las muestras analizadas de carbón activado se utilizaron las siguientes ecuaciones como se indica en la norma:

Ecuación 12. Cantidad en mg de yodo adsorbidos por gramo de CA

$$\frac{X}{M} = \frac{A - (2,4 * B * \text{ml usados de sln de tiosulfato})}{\text{gramos de CA empleados}}$$

$$A = N1 * 6346,5$$

$$B = N2 * 126,93$$

³⁷ AGUAPEDIA. Trabajo de grado Máster en Ingeniería del Agua. Manual del Carbón Activado. España: Escuela Politécnica Superior Universidad de Sevilla.

Donde:

$\frac{X}{M}$: mg de yodo adsorbido por gramo de CA.

N1: normalidad de sln de yodo.

N2: normalidad de sln de tiosulfato.

Ecuación 13. Normalidad residual del filtrado.

$$C = \frac{N2 * ml \text{ de tiosulfato gastado}}{25ml}$$

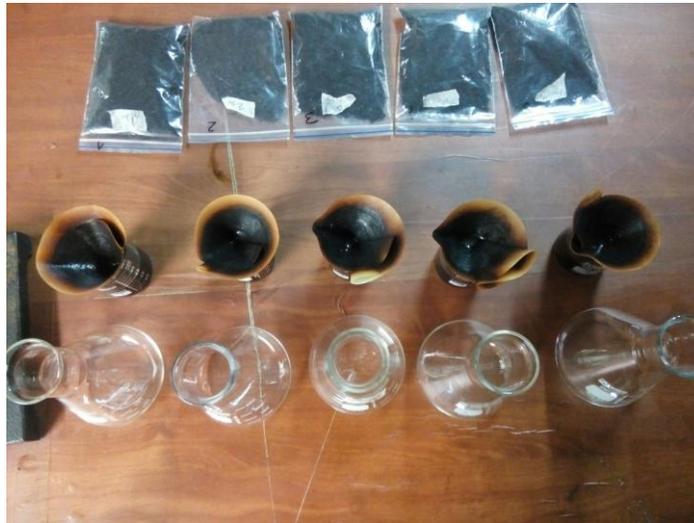
Ecuación 14. Índice de yodo de la muestra de CA.

$$\text{Numero de yodo} = \frac{X}{M} * D$$

D: normalidad del filtrado residual (C), corregido.

En la figura 17 se puede apreciar las muestras de filtradas después de que el carbón activado tuvo contacto con la solución de yodo 0,1 N.

Figura 16. Filtrado de las muestras representativas de solución de yodo más CA



En la figura 18 se observa una muestra filtrada que va a ser titulada con tiosulfato de sodio, se determina la cantidad de tiosulfato utilizado en la titulación y a partir de este se hace la determinación de índices de yodo como se indicó anteriormente, en general para la titulación se utilizaron de 2 a 5 mL de tiosulfato.

Figura 17. Titulación de la solución remanente del filtrado con tiosulfato de sodio. Para cada titulación se utilizaron de 2 a 5 mL de tiosulfato.



El índice de yodo da un valor estimado del área superficial del carbón activado, que a su vez indica las propiedades de adsorción del carbón activado producido pues entre mayor sea el área superficial de este será mayor su capacidad de adsorción. A continuación, en la tabla 25 se presentan los resultados del índice de yodo determinado para la muestra de carbón activado producido bajo las condiciones que se establecieron en el capítulo 3. La variación de la temperatura, tiempo de residencia y flujo de agente activante, son variables importantes para el proceso de activación del carbonizado pues estas influyen sobre las propiedades del producto.

Tabla 25. Resultados de índices de yodo para las muestras de Carbón activado

Índices de yodo				
Muestra	Flujo agente activante (ml/min)	Temperatura (°C)	Tiempo R. (min)	Índice de yodo (mg yodo/mg CA)
1	50	700	60	734,23
2		700	90	802,86
3		800	60	876,4
4		800	90	903,4
5		900	60	1005,08
6		900	90	997,29
7	100	700	60	812,5
8		700	90	847,2
9		800	60	834,6
10		800	90	884,61
11		900	60	1082,3
12		900	90	1152,7

Como se puede observar en la tabla 25 en general se obtienen carbones activados con elevadas áreas superficiales, sin embargo, a mayor temperatura de activación y mayor flujo de agente activante se genera un carbón activado con mejores características. El agente activante facilita las reacciones oxidativas entre el ambiente y la superficie del carbonizado, por lo que se puede concluir que a mayor flujo mayor cantidad de poros en la estructura física del material y además la porosidad inicial del material mejora ya que se liberan los poros. El área superficial se define principalmente por la cantidad de microporos, estos aportan la mayor porción del área con respecto a los meso y macroporos. En el carbón activado, para los carbones activados producidos se aprecia una mayor afinidad a la adsorción de moléculas pequeñas.

5.2 ÍNDICE DE AZUL DE METILENO

Es el número de mililitros de una solución estándar de azul de metileno decolorada por 0,1 g de carbón activado (en base seca) permite conocer la capacidad de adsorción de un carbón activado frente a moléculas grandes mesoporos y macroporos. En las pruebas se utilizó una solución de azul de metileno con una concentración inicial de 1.2 g/L.

Para la determinación de índices de azul de metileno del carbón activado producido previamente se preparan las muestras se muele y se tamiza haciendo pasar el material por la malla número 325 como lo indica la NTC 4467. En el análisis se utilizan los siguientes reactivos, para la preparación de las respectivas soluciones como sugiere la norma:

- Agua destilada.
- Azul de metileno puro.
- Ácido acético.

Se prepara la solución de azul de metileno de concentración 1.2 g/L y se verifica la solución diluyendo con ácido acético y midiendo la absorbancia a 620 nm. En seguida, se miden 25 ml de solución de azul de metileno y se ponen en contacto con 0,1 g de carbón activado se agita hasta que ocurra la decoloración, en seguida se agregan 5 ml de solución de azul de metileno en un periodo no mayor a 5 minutos se agrega la solución hasta que se sature y no ocurra decoloración. Se miden los mililitros totales de solución de azul de metileno agregada. El índice de azul de metileno es el volumen de solución de azul de metileno en mililitros decolorada por la muestra de carbón activado.

Grafica 6. Muestras de soluciones representativas de azul de metileno en contacto con CA



Se analizaron las muestras de carbón activado producido para determinar el índice de azul de metileno. A continuación, se presentan los resultados en la tabla 26.

Tabla 26. Índice de azul de metileno

Índices de azul de metileno

Muestra	Flujo agente activante (ml/min)	Temperatura (°C)	Tiempo R. (Min)	Índice de azul de metileno (ml adsorbidos por 0,1 g de CA)
1	50	700	60	10
2		700	90	12
3		800	60	11
4		800	90	13
5		900	60	14
6		900	90	16
7	100	700	60	11
8		700	90	13
9		800	60	15
10		800	90	14
11		900	60	15
12		900	90	16

Los resultados de análisis de índice de azul de metileno en las muestras de carbón activado se muestran en la tabla 26, donde se puede observar que en su mayoría las muestras analizadas presentan un índice elevado pues la cantidad de mililitros adsorbida por el carbón activado es representativa ya que para todas las muestras fue superior a 10 mL, esto indica un elevada mesoporosidad lo que permite una mejor y más rápida adsorción dentro del carbón activado de moléculas grandes o de tamaño similar a la molécula de azul de metileno (tamaño de la molécula $\geq 1,5$ nm)³⁸.

Además, con los resultados de la tabla 26, teniendo en cuenta las variables del proceso de producción para la obtención de cada muestra se puede apreciar la influencia de estas variables sobre el índice de azul de metileno que da una caracterización de la meso y macroporosidad del carbón activado, por lo que resulta conveniente la producción del CA a temperatura de 900°C con 100mL/min de agente activante y un tiempo de residencia de 90 min; la producción de CA con estas condiciones de proceso propicia en la muestra un mayor índice de azul de metileno con lo que se define la buena capacidad de adsorción del CA frente a moléculas grandes

³⁸ PADRON, Rolando. El carbón activado, un material adsorbente. Universidad de Matanzas. 2013.

5.3 DENSIDAD APARENTE

La densidad aparente es el peso en g/cm^3 de carbón activado seco en el aire, incluye el volumen de los poros y de los espacios entre las partículas de carbón. En una probeta se introdujo 10 g de muestra de carbón activado, haciendo presión y apisonándola hasta que se haya transferido toda la muestra, y no haya más asentamiento en la probeta. Se observa el volumen del carbón activado asentado. Para la determinación de la densidad aparente se utilizó la siguiente ecuación:

Ecuación 15. Densidad aparente.

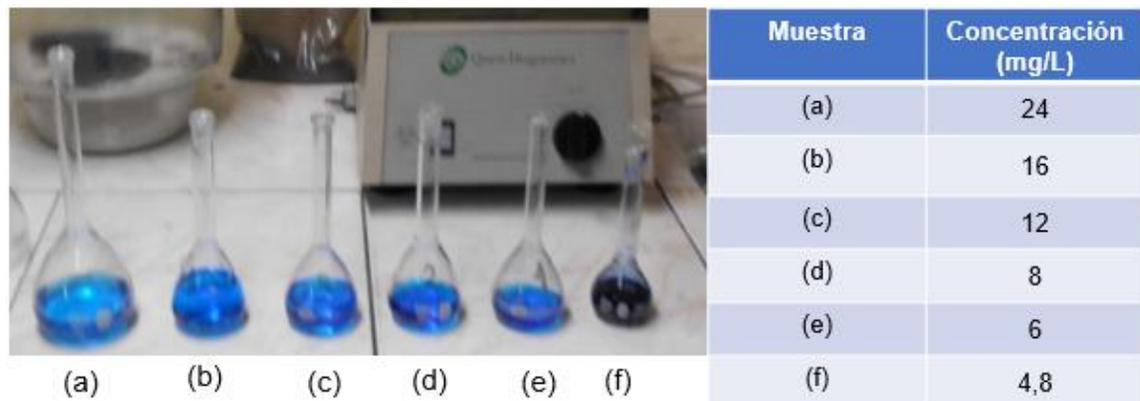
$$\rho(a) = \frac{(\text{peso de la muestra en gramos}) * (100 - \%humedad)}{(\text{volumen de la muestra en centímetro cúbicos}) * 100}$$

La densidad aparente determinada para el carbón activado fue de $0,76 \text{ g/cm}^3$. Esta variable es la base para determinar el volumen de cama necesaria para contener una determinada masa de carbón activado granular. Su valor determina en gran parte el flujo de agua necesario para lograr un buen retrolavado del carbón.

5.4 ISOTERMA DE FREUNDLICH

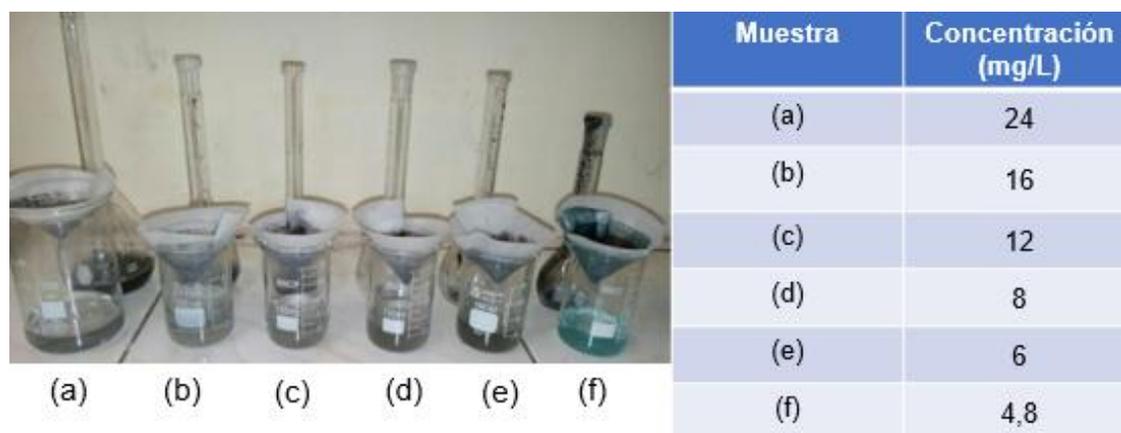
Se determina con el fin de conocer la capacidad de adsorción del carbón activado. El procedimiento se desarrolló teniendo en cuenta la NTC 4467, se tomaron 5 muestras de la solución de azul de metileno diluida con concentraciones conocidas presentadas en la tabla 27. Se leyó su absorbancia en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 620 nm y se realizó una curva de absorbancia. En seguida se tomaron 5 muestras de carbón activado de diferente peso y se pusieron en contacto con 25 ml de la solución de azul de metileno durante 5 min se filtró y se leyó la absorbancia a 620 nm de cada muestra filtrada. En la figura 19 se aprecian las muestras de azul de metileno diluidas con diferentes concentraciones.

Figura 18. Muestras diluidas de azul de metileno



En la figura 20 se aprecian las soluciones de azul de metileno filtradas después de estar en contacto con la muestra de carbón activado.

Figura 19. Muestras filtradas de azul de metileno

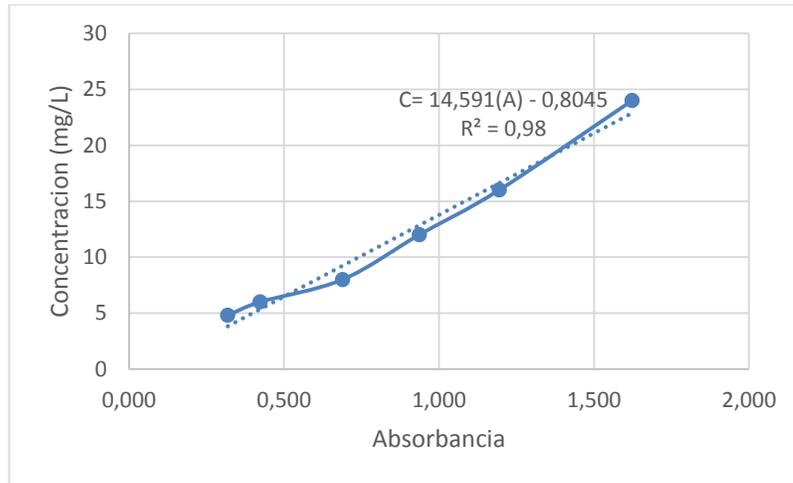


A continuación, en la tabla 27 se presentan las diluciones que se realizaron, la concentración de las muestras diluidas y la absorbancia medida por el espectrofotómetro para determinar la curva de absorbancia con respecto a la concentración de la muestra.

Tabla 27. Diluciones y absorbancia de las muestras

Dilución	Concentración (mg/L)	Absorbancia A 620 nm
1:50	24	1,623
2:15	16	1,194
2:40	12	0,936
3:30	8	0,689
4:20	6	0,423
5:10	4,8	0,318

Grafica 7. Curva absorbancia de las muestras diluidas



En la gráfica 12 se observa que la absorbancia incrementa de manera directamente proporcional a la concentración de la muestra, además al realizar la regresión lineal a la gráfica, se obtiene una correlación casi lineal, por lo que la curva resulta adecuada para la determinación de concentración para las muestras en el análisis de isoterma de Freundlich.

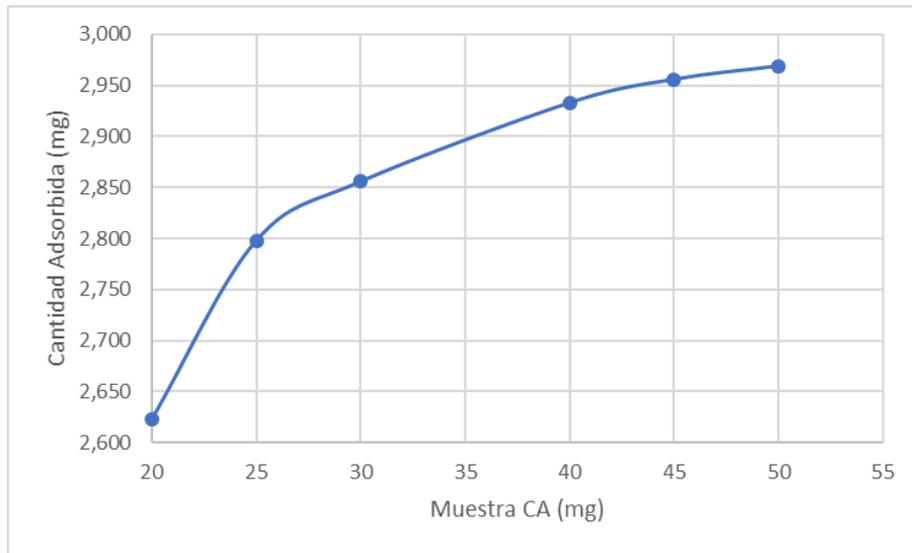
Se pesaron diferentes muestras de carbón activado y se pusieron en contacto con 25 mL de solución de azul de metileno, después de filtradas las muestras de cálculo la concentración con la gráfica 10. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 28. Resultados isoterma Freundlich

Muestra de carbón activado (mg)	Absorbancia	Concentración (mg / L)	Cantidad adsorbida (mg)
20	1,243	17,332	2,623
25	0,954	13,115	2,798
30	0,265	3,062	2,856
40	0,143	1,282	2,933
45	0,104	0,713	2,956
50	0,085	0,4357	2,968

Teniendo en cuenta la tabla 28 se grafican las cantidades de azul de metileno adsorbidos respecto a la cantidad de carbón activado con la que se puso en contacto.

Grafica 8. Isoterma de Freundlich.



De acuerdo a la gráfica 11 se observa que cuando se pone en contacto una muestra de CA a partir de 40mg se genera un equilibrio y el CA empieza llegar a su límite de adsorción de adsorbato, puesto que en las siguientes muestras (45mg y 50 mg) la cantidad adsorbida es muy similar con respecto a la antes mencionada.

5.5 ISOTERMA DE TIEMPO DE CONTACTO

La isoterma de tiempo de contacto se hace con el fin de determinar la capacidad de adsorción del carbón activado producido se prepara la muestra y se pesan 20 mg de muestra de carbón activado para poner en contacto con la solución de azul de metileno durante diferentes tiempos entre 1 y 10 minutos luego se filtró la muestra y al filtrado se le midió la absorbancia a 620nm como lo indica la norma NTC 4467.

Figura 20. Muestras filtradas de isoterma de tiempo de contacto.

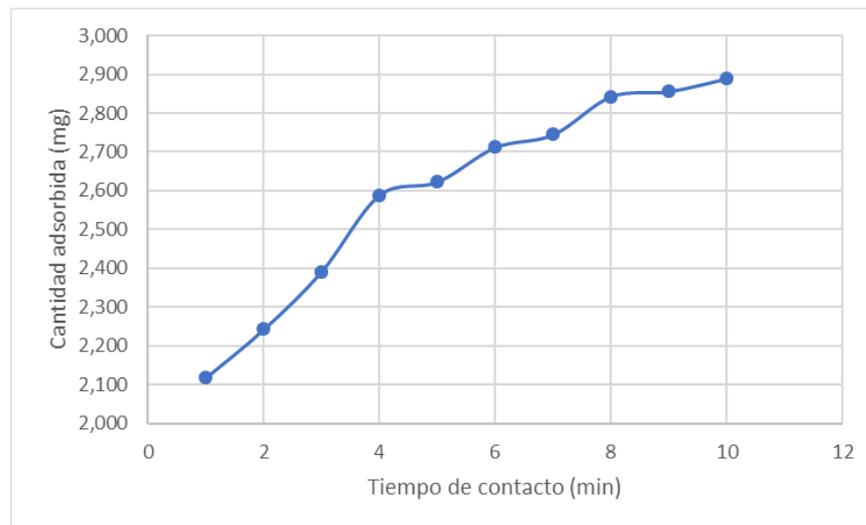


A continuación, se presenta la tabla de resultados de la isoterma de tiempo de contacto determinando la cantidad adsorbida en mg de adsorbato teniendo en cuenta el tiempo de contacto de CA.

Tabla 29. Resultados de isoterma de tiempo de contacto

Tiempo (min.)	Absorbancia	Cantidad adsorbida (mg)
1	2,564	2,118
2	1,943	2,243
3	1,732	2,392
4	1,329	2,589
5	1,023	2,623
6	0,943	2,712
7	0,788	2,745
8	0,741	2,843
9	0,629	2,856
10	0,582	2,889

Gráfica 9. Isoterma de tiempo de contacto



En la gráfica 12 se observa que a entre más tiempo de contacto se someta la solución del azul de metileno con la muestra de carbón activado hay mayor adsorción de este en los primeros minutos de contacto, en los últimos ensayos (>7 min) realizados ocurre adsorción, pero en proporciones similares por lo que a estos

tiempos de contacto se llega a la saturación del carbón activado y la adsorción de este.

6. CONCLUSIONES

- Una manera efectiva del manejo de los residuos agroindustriales con elevados contenidos de carbono en su estructura es su aprovechamiento para generar productos de alto valor agregado como lo es el carbón activado, a partir de materiales que son considerados desechos
- Las características y la calidad del carbón activado están estrechamente relacionadas con las variables de operación como la temperatura, tiempo de residencia y el flujo de agente activante en la fase de la activación para la producción de este
- El análisis de las variables del proceso tales como: temperatura y tiempo de residencia para la carbonización, y temperatura, tiempo de residencia y flujos de vapor de agua para la activación, permite optimizar, en base a los resultados obtenidos, las condiciones de producción para la obtención del producto a escala industrial.
- En la fase de carbonización se debe seleccionar la temperatura más adecuada para que se desarrolle la descomposición térmica del material lignocelulósico, debido a que si opera a temperaturas demasiado bajas no se elimina en su totalidad el contenido volátil que contiene el material, y si la temperatura es muy elevada el material se quema en su totalidad
- Se deben controlar las variables de operación como la temperatura y el tiempo que permanece en los hornos para la producción de carbón activado, pues si sobrepasa sus límites, el carbonizado puede sufrir fractura o incineración total del producto.
- El flujo del agente activante en la fase activación es muy influyente en la liberación de los poros del carbonizado, ya que, al existir mayor contenido de este en el ambiente del horno, las reacciones de oxidación se desarrollan con mayor facilidad al existir abundancia de oxígeno en el ambiente y además las condiciones de temperatura a las que se encuentra.
- La caracterización de las muestras de carbón activado, permiten conocer la calidad y características del producto, para las muestras producidas se obtuvieron altos índices de yodo y azul de metileno, por lo que se concluye que el material generado tiene buenas propiedades absorbentes, apropiadas para la aplicación industrial.

7. RECOMENDACIONES

- Revisión de los sistemas de diseño de los hornos para mejorar los rendimientos de producción de carbón activado.
- Automatización total de la planta para mejorar el control de la temperatura de cada fase y hacer efectiva la producción de carbón activado con características uniformes.
- Mejoras para el aprovechamiento de la energía liberada por los gases volátiles producto de la gasificación y combustión en el horno de activación. Se puede implementar en el sistema de secado de la materia prima.
- Revisión de las pérdidas de calor en el proceso de activación donde se puede implementar un sistema de aislamiento térmico para que se generen menos pérdidas.

BIBLIOGRAFÍA

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

ALVAREZ, Carlos. Colombia apuesta al millón de hectáreas de palma de aceite. En: Portafolio [En línea] (27 septiembre de 2015) disponible en <www.portafolio.co/negocios/empresas/colombia-apuesta-millon-hectareas-palma-aceite-39680> [citado el 16 de diciembre de 2016]

BLANCO CALVO, Olaia. Trabajo de grado Ingeniería Química. Tecnologías de membranas y de adsorción en procesos de potabilización de aguas salobres para la eliminación de compuestos disueltos. 2011. España: Universidad Politécnica de Cataluña.

DIAZ, Tatiana. DURAN, Dayana. Obtención de carbón activado a partir de cuesco de palma por activación física a escala planta piloto. Bogotá: Fundación Universidad de América. (2008)

EMERY, Eder. Destilación secundaria de alquitranes generados en la gasificación de cuesco de palma. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. (2014)

FEDEPALMA. Febrero. 2011. Guía ambiental de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia. [Sitio web] Disponible en: <<http://www.ambientalex.info/guias/Guiambagrpalaceco.pdf>>

FL SMITH & Co. Gases - Specific Heat Capacities and Individual Gas Constants. Disponible en <http://catalog.conveyorspneumatic.com/Asset/FLS%20Specific%20Heat%20Capacities%20of%20Gases.pdf>

GOMEZ, Alexander. Pirolisis de biomasa, cuesco de palma. Universidad de Kassel. 2008

GONZALEZ, Héctor. TERUYA, Renzo. Estudio preliminar de carbón activado; situación en el Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. 2004.

GONZALEZ, Lourdes. GARCIA, Ariel. GOMEZ, Alain. RODRIGUEZ, Clara. PADRON, Rolando. El carbón activado, un material adsorbente. Cuba: Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos; p.4

GONZALEZ GARCIA, Ana. Tesis doctoral Ingeniería Química. Residuos biomasicos como precursores de absorbentes para la captura de CO₂ en condiciones de postcombustión. 2013. Universidad de Oviedo. España.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá: El Instituto, 2008, p.1

_____.Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá: El Instituto, 2008, p.12.

_____. Referencias documentales para fuentes de informaciones electrónicas. NTC 4490. Bogotá: El Instituto, 1998, p.2.

KWIATKOWSKI, James F. Carbón Activado: Clasificaciones, Propiedades Y Aplicaciones. Nueva York: Nova Science Publishers, Inc, 2012. p. 250. Colección de libros electrónicos (EBSCOhost)

LOPEZ, Juan. Desarrollo de un carbón activado granular mediante activación física en un horno rotatorio. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Minas. Procesos y energía. Medellín. 2014

MARSH, H.; HEINTZ; ROGUIDEZ-REINOSO, F.: Activated Carbon. London y otras: Elsevier, 2006. Citado por: GOMEZ, Alexander. KLOSE, Wolfgang. RINCON, Sonia. Carbón activado de cuesco de palma. Estudio de termogravimetría y estructura. Kassel, 2010.

MARTIN GULLON, Ignacio. Diseño, construcción y operación de una planta piloto para la obtención de carbones activados. Universidad de alicante. Alicante, España.

MATOS, Juan. Efecto catalítico de la composición química de biomasa sobre los parámetros cinéticos asociados a la síntesis de carbón activado. Asociación Interciencia. Venezuela.2010.

MENDOZA, Santiago. Residuos de palma africana purifican agua y aire. En: UN Periódico [En línea] (10 de mayo de 2014) disponible en <<http://www.unperiodico.unal.edu.co/vpp/article/residuos-de-palma-africana->

purifican-agua-y-aire.html?TB_iframe=true&height=600&width=690> [citado el 16 de diciembre de 2016]

PADRON, Rolando. El carbón activado, un material adsorbente. Universidad de Matanzas. 2013.

OLEOFINOS, S.A de C.V. Aceite de palma. La Palma africana. México. [Sitio web] Disponible en: <
[http://palma.aceitescomestibles.com/index.php?option=com_content&view=article
&id=5:la-palma-africana&catid=48:datos-generales&Itemid=1](http://palma.aceitescomestibles.com/index.php?option=com_content&view=article&id=5:la-palma-africana&catid=48:datos-generales&Itemid=1)>

OOCITIES. Ingeniería de tratamiento y acondicionamiento de Aguas. Tratamiento con carbón activado. Oocities.org. [En línea] disponible en <<http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/carbon6.pdf>> [citado el 10 de octubre de 2016]

ROJAS, Andrés. BARRAZA, Juan. Caracterización morfológica del carbonizado de carbones pulverizados: determinación experimental. Universidad Nacional sede Palmira. Universidad del Valle. Cali. 2007.

ROMERO, Lina. CRUZ, María. SIERRA, Fabio. Efecto de la Temperatura en el potencial de aprovechamiento energético de los productos de la pirolisis del cuesco de palma. Universidad Francisco José de Caldas. Bogota.2016.

SOUZA-SANTOS, M. L. D. 2004. Solid Fuels Combustion and Gasification : Modeling, Simulation, and Equipment Operation. Marcel Dekker, New York, USA. Citado por: PILON, Guillaume. Utilization of arecanut (Areca catechu) husk for gasidication. Montreal. 2007

TECSOL. Informe técnico construcción de una planta piloto para producir carbon activado a partir de cuesco de palma. Bogotá. 2011.

TECSOL Ltda. Mejoramiento de la planta piloto de carbón activado de Tecsol para explotación comercial. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.2016

USUGA, Lina. Carbón, Análisis Próximo. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. [Sitio web] Disponible en:[http://www.unalmed.edu.co/~ctcarbon/analisis_proximos.htm#Humedad superficial](http://www.unalmed.edu.co/~ctcarbon/analisis_proximos.htm#Humedad%20superficial).

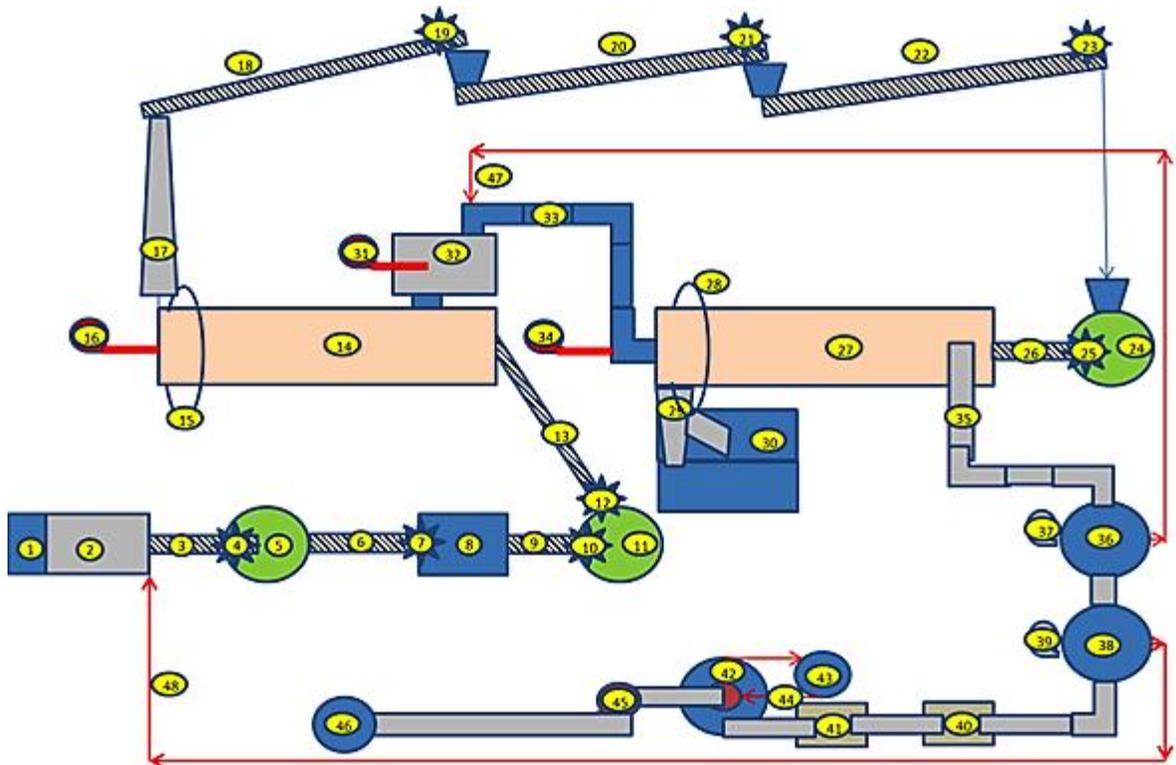
VARRIANO, Nicolás. GIL, Marcelo. COZZARIN, Raúl. Producción sustentable de carbón activado a partir de caña de bambú. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata. Argentina.

ANEXOS

ANEXO A
ANALISIS TERMOGRAVIMETRICO EN EL CUESCO DE PALMA

Se adjuntan los registros de resultados del equipo termogravimétrico del análisis en el CD.

ANEXO B
DISEÑO Y EQUIPOS DE LA PLANTA DE PRODUCCION DE CA



#	Equipo	Función
1	Tolva cuesco crudo	Alimenta y dosifica el cuesco crudo al secador
2	Secador	Seca el cuesco crudo a moler
3	Tornillo transportador	Traslada el cuesco seco del secador a la tolva de almacenamiento
4	Moto reductor	Acciona el tornillo transportador
5	Tolva	Almacenamiento de cuesco seco
6	Tornillo transportador	Traslada y dosifica el cuesco seco de la tolva de almacenamiento al molino de martillos
7	Moto reductor	Acciona el tornillo transportador
8	Molino de martillos	Muele el cuesco a la granulometría requerida
9	Tornillo transportador	Traslada el cuesco molido del molino a la tolva de almacenamiento
10	Moto reductor	Acciona el tornillo transportador
11	Tolva	Almacena el cuesco seco y molido
12	Moto reductor	Acciona el tornillo transportador
13	Tornillo transportador	Traslada y dosifica el cuesco seco y molido al horno de carbonización

#	Equipo	Función
14	Horno carbonización	Se encarga de carbonizar el cuesco para la activación
15	Serpentín	Descarga y enfría el material carbonizado que sale del horno de carbonización
16	Quemador de gas natural	Se encarga de precalentar el horno de carbonización para iniciar la carbonización, opera hasta cuando se alcanza la temperatura en la cual el horno es auto térmico.
17	Zaranda	Traslada y dosifica el material carbonizado al sistema de tornillos transportadores que lo llevan a activación
18,20,22	Tornillo transportadores	Trasladan el material carbonizado hasta la tolva de almacenamiento para alimentarlo al horno de activación
19, 21, 23	Moto reductores	Acciona el sistema de tornillos transportadores de material carbonizado a activación.
24	Tolva	Almacena el material carbonizado, listo para activación
25	Moto reductor	Acciona el tornillo transportador que alimenta al horno de activación
26	Tornillo transportador	Traslada y dosifica el material carbonizado al horno de activación
27	Horno de activación	Permite establecer las condiciones de temperatura, tiempo de residencia y atmosfera para activar el material carbonizado
28	Serpentín	Descarga y enfría el material activado que sale del horno de activación
29	Zaranda	Descarga y clasifica el carbón activado que sale del horno de activación
30	Tolva	Recolecta y almacena el material activado clasificado en granular y polvo
31	Quemador de gas natural	Se encarga de precalentar la cámara de combustión para la quema de los productos de la carbonización del cuesco
32	Cámara de combustión	Crea las condiciones de temperatura, turbulencia y tiempo de residencia para quemar los productos de la carbonización del cuesco
33	Ductos	Se encargan de transportar los gases de combustión de la cámara de combustión al horno de activación
34	Quemador de gas natural	Encargado de precalentar el horno de activación hasta la temperatura de operación, cuando el

#	Equipo	Función
		horno de carbonización opera en condiciones auto térmicas se sustituye por un quemador de flauta para completar la combustión de los productos de carbonización
35	Ducto de gases	Se encarga de evacuar los gases del horno de activación pasándolos a través de los intercambiadores, del sistema de depuración de gases y entregarlo a la chimenea para su descarga limpios a la atmosfera
36	Intercambiador	Encargado de recuperar energía de los gases de activación para precalentar aire con destino a la combustión en la cámara de combustión y horno de activación
37	Soplador de aire	Inyecta al intercambiador el aire a precalentar y lo impulsa hasta la cámara de combustión y horno de activación
38	Intercambiador	Encargado de recuperar energía de los gases de activación para precalentar aire con destino al secado del cuesco crudo.
39	Soplador de aire	Inyecta al intercambiador el aire a precalentar y lo impulsa hasta el secador de cuesco crudo
40, 41	Sedimentadores	Inician el proceso de depuración de los gases que salen del horno de activación, precipitando el material particulado de mayor tamaño
42	Lavador de gases	Encargado de completar la limpieza de los gases mediante lavado con agua en contracorriente
43	Tanque	Almacenamiento del agua de lavado de los gases
44	Bomba sumergible	Recirculación del agua de lavado de los gases
45	Extractor	Crear el tiro inducido para la evacuación de los gases del sistema de activación y entregarlos a la chimenea.
46	Chimenea	Encargada de emitir los gases a la atmósfera para su dispersión en forma segura
	Motores	Todos los equipos que requieren movimiento cuentan con sus respectivos motores: secador, hornos, tornillos transportadores, zarandas, quemadores, sopladores, extractor, bomba sumergible.
	Tablero de control	Centraliza los comandos automáticos y manuales de operación de la planta, para una

#	Equipo	Función
		operación estable que garantice la calidad y uniformidad del producto obtenido

Fuente: TECSOL. Informe final Mejoramiento de la planta piloto de carbón activado de Tecsol para explotación comercial. 2017.

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2017

AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES

Yo **Branda Lindsay Agudelo Álvarez** en calidad de titular de la obra **Estandarización del proceso de producción de carbón activado por activación física a partir de cuesco de palma a escala industrial**, elaborada en el año 2016, autorizo al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que me corresponde y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autor manifiesto conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autor establezco las siguientes condiciones de uso de mi obra de acuerdo con la **licencia Creative Commons** que se señala a continuación:

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2017

	Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.	xxx
	Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.	xxx
	Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma.	xxx

Licencias completas: http://co.creativecommons.org/?page_id=13

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a su autor.

De igual forma como autor autorizo la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)	SI	NO
La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso	xxx	
La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación	xxx	

Información Confidencial: este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso.	SI	NO
		xxx

Para constancia se firma el presente documento en Bogotá, a los 21 días del mes de Julio del año 2017.

LA AUTORA:

Autora

Nombres	Apellidos
Branda Lindsay	Agudelo Álvarez
Documento de identificación No	Firma
Cedula de Ciudadanía 1.121.891.773	