

UNIVERSIDAD DE MATANZAS "CAMILO CIENFUEGOS"
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA



TRABAJO DE DIPLOMA

TÍTULO: PROPUESTA DE LA UTILIZACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO HECHO CON LA CÁSCARA DE LA JATROPHA CURCAS (CAJC) Y DE LA MADERA DE MARABÚ (CAMM), EN LA FILTRACIÓN DE AGUARDIENTE.

Tesis presentada en opción al título de Ing. Químico.

AUTORA: Niurka Moya García.

TUTOR: MSC. Ariel García Cruz.

CO-TUTOR: Ing. PABLO R. RODRÍGUEZ MARTÍNEZ.

PROFESOR CONSULTANTE: MARIO YU GIL.

Matanzas, 2012.



Declaración de autoridad.

Yo, Niurka Moya García, declaro que soy el único autor de esta Tesis de Grado y lo pongo a disposición de las entidades interesadas en el tema en estudio y de La Universidad “Camilo Cienfuegos”, para hacer uso del mismo con el objetivo y finalidad que se estime conveniente.

Firma del Estudiante:

Fecha:

Nota de aceptación

Presidente del Tribunal

Firma

Miembro del Tribunal

Firma

Miembro del Tribunal

Firma

CIUDAD

FECHA



PENSAMIENTO.

“Cometa sus errores en escala pequeña y obtenga sus ganancias en gran escala”.

(Blackeland, 1916)



DEDICATORIA

A mis hijos, como madre mortal,

Les debo todo.

De mis hijos lleno mis momentos bellos.

Sus travesuras, son mi orgullo.

Sus palabras, sus órdenes.

Su presencia, la vida misma.

A mis hijos, mi mejor parte.

Mis mejores consejos.

Mis mejores regaños, tal vez,

Los más fuertes, pero los más sinceros

Ale y Patri, palabras que llenan mi boca,

De amor y orgullo.

De responsabilidad con su presencia.

A mis hijos,

Dedico esta tesis y toda mi vida,

De mis hijos, extraigo.

El inmenso amor que hay en mí

Por sus existencias.



AGRADECIMIENTOS

Para la culminación de la presente tesis de grado y de la etapa que hoy cierra en mi vida son muchas las personas que me han ayudado a alcanzar esta meta, no sería justo comenzar a mencionar nombres, sabiendo que puede faltar alguien en la lista. Por eso gracias a todos los que me tendieron su mano y confiaron en mí.

- ❖ A los profesores del departamento de química e ingeniería química, quienes no solo transmiten conocimientos, sino que nos forman como profesionales.
- ❖ A mi tutor Ariel García y al ingeniero Pablo R. Rodríguez por dedicar parte de su tiempo en la realización de este trabajo.
- ❖ A mi esposo por su amor y por formar parte de esta etapa de mi vida.
- ❖ A mi familia por su apoyo incondicional y por hacerme sentir amada.



RESUMEN

El presente trabajo de diploma se realiza en la Ronera- Cárdenas, de la Corporación Cuba-Ron SA. y en coordinación con la Estación Experimental de Pastos y Forrajes: "Indio Hatuey" situada en el municipio de Perico, Matanzas. El mismo consiste en evaluar la factibilidad técnica de utilización de los carbones activados provenientes de la cáscara de *Jatropha curcas* L. (CAJC) y la madera de marabú (CAMM), en la etapa de filtración del aguardiente, con el propósito de sustituir el utilizado en dicha industria por su elevado costo en el mercado. Los carbones activados en estudio se obtienen, el primero, por un método químico con ácido sulfúrico y el segundo por gasificación. Se realiza la caracterización de estos y se determina sus influencias sobre los parámetros de calidad del adsorbato. Los resultados obtenidos demuestran que técnicamente es posible sustituir el carbón activado Norit Rox-08 actualmente utilizado en la industria, por el CAMM y no por el CAJC, ya que este último altera la acidez total y la coloración del aguardiente.

Summary.

The present diploma work is carried out in the Ronera - Cárdenas, of the Corporation Cuba-Ron SA. and in coordination with the Experimental Station of Grasses and Forages: "Indio Hatuey" located in the municipality of Perico, Matanzas. The same one consists on evaluating the technical feasibility of use of the activated carbons coming from the shell of *Jatropha curcas* L. (CAJC) and the marabout wood (CAMM), in the stage of filtration of the liquor, with the purpose of substituting the utilized one in this industry for their high cost in the market. The activated carbons in study are obtained, the first one, for a chemical method with sulfuric acid and the second for gasification. It is carried out the characterization of these and it is determined their influences on the parameters of quality of the adsorbate. The obtained results demonstrate that technically it is possible to substitute the activated carbon Norit Rox-08 at the moment used in the industry, by the CAMM and not for the CAJC, since this last one alters the total acidity and the coloration of the liquor.

Índice.

Introducción.....	1
Capitulo 1. Revisión Bibliográfica.	
1.1 El Carbón Activado.....	5
1.2 Materias primas para la elaboración de los carbones activados.....	6
1.2.1. La <i>Jatropha Curca</i> L. y su uso en la obtención de carbón activado.....	6
1.2.2 Disponibilidad de <i>La Jatropha Curcas</i> L. en Cuba.....	8
1.2.3 El Marabú y su uso en la obtención de carbón activado.....	8
1.2.4 Disponibilidad del Marabú en Cuba.....	9
1.3 Métodos de Obtención de carbón activado.....	10
1.3.1 La Activación Química.....	11
1.3.2 La Activación Física o del Vapor.....	12
1.4. Características generales de los carbones activados.....	15
1.5 Usos del carbón activado en la filtración del aguardiente.....	17
1.6 Conceptos básicos de escalado, de diseño y confección de un filtro empacado con carbón activado.....	18
Conclusiones Parciales.....	22
Capítulo 2. Materiales y Métodos.	
2.1 Caracterización del proceso tecnológico.....	23
2.1.1 Descripción del proceso de fabricación de los rones.....	23
2.2 Obtención de los carbones activados: CAJC y CAMM.....	26
2.2.1 Muestreo y preparación de la muestra.....	26
2.2.2 Obtención de CAJC mediante un método químico con H ₂ SO ₄	26

2.2.3 Obtención de CAMM mediante gasificación.....	27
2.2.4 porcentaje de rendimiento de los métodos de obtención de los carbones: CAJC y CAMM.....	29
2.3 Caracterización de los carbones activados: Rox-08, CAJC y CAMM.....	29
2.3.1 Determinación del % de Humedad.....	29
2.3.2 Determinación del % de Cenizas.....	30
2.3.3 Determinación de la Densidad Aparente.....	30
2.3.4 Determinación del índice de Azul de Metileno.....	30
2.4 Diseño y confección de filtros empacados con carbón activado.....	31
2.4.1 Confección de seis mini-columnas de vidrios empacadas con los carbones: CAJC, CAMM y Norit Rox-08.....	32
2.4.2 Diseño y confección de un filtro empacado con carbón activado.....	32
2.5 Determinación de los parámetros de calidad del aguardiente filtrado.....	33
2.5.1 Medición del Grado Alcohólico.....	33
2.5.2 Determinación de la Acidez Total.....	34
2.5.3 Evaluación Sensorial.....	35
Capitulo 3. Análisis y Resultados.	
3.1 Etapa de obtención de los carbones activados.....	36
3.2 Caracterización de los carbones activados.....	38
3.3 Etapa del diseño y confección de filtros empacados con carbón activado.....	42
3.3.1 Determinación de la altura mínima de carbón activado para alcanzar la acidez normada.....	42

3.3.2 Diseño y confección de un filtro empacado con el carbón activado seleccionado.....	44
3.4 Determinación de los parámetros de calidad del aguardiente filtrado con CAMM.....	45
3.4.1 Medición del grado alcohólico.....	45
3.4.2 Determinación de la acidez total del aguardiente añejo filtrado con CAMM.....	46
3.4.3 Evaluación Sensorial.....	47
3.5 Análisis económico.....	47
Conclusiones.....	48
Recomendaciones.....	49
Bibliografía.....	50
Anexos.....	57

Introducción.

El desarrollo vertiginoso del turismo y la preferencia de Cuba como destino, obliga a mejorar la calidad de las bebidas que se ofertan en los bares, lo que evidencia que la coctelería forma parte de la cultura cubana por su reconocido prestigio y fama internacional, (Fabregat, 2001). Coincidiendo con lo planteado, para atender a estas necesidades, las entidades involucradas en la producción de rones también buscan mejorar sus productos. Así se encuentra a la Corporación Cuba-Ron SA., quien tiene situada en el municipio de Cárdenas una fábrica de rones, la cual trabaja día a día para optimizar su proceso productivo, aumentar la calidad de sus productos y poder seguir compitiendo en el mercado mundial.

Según (Brizuela, 1987) el mejoramiento de la eficiencia técnico- productivo de un proceso industrial existente se puede lograr mediante la modificación de sus condiciones de operación y/o a través de cambios en el equipamiento que conforma la planta. Dentro de las variantes técnico – económicas que se propongan, deben tomarse aquellas que aseguren la obtención de un producto con la calidad requerida.

El aguardiente es la materia prima que imprime un sello distintivo a los rones cubanos. En el proceso de fabricación, el destufado, es una etapa de vital importancia. Para realizarlo se utilizan filtros empacados con carbón activado. Este es uno de los absorbentes más usados en el mundo, debido a su gran capacidad de adsorción y a su facilidad relativa de regeneración. De la adsorción, que es su principal propiedad (Glasstone, 1968) plantea: es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas de un fluido son atrapados o retenidos en la superficie de un sólido poroso. Es decir que la adsorción de una sustancia es su acumulación en una determinada superficie interfacial entre dos fases, donde el resultado es una película líquida o gaseosa en la superficie de un cuerpo sólido. Algunas de las sustancias solubles que se fijan por adsorción son: sustancias no polares (Aceite mineral, BTEX, Poli-hidrocarburos aromáticos, Cloruro, Fenol); sustancias halógenas (I, Br, Cl, H y F); además del olor, gusto, levaduras, varios productos de la fermentación y otros.

Los carbones activados son preparados por métodos de activación física y/o química. Para obtener este producto por el método químico (Kumar, 2009) utiliza en sus estudios: H_2SO_4 , HCl, HNO_3 , H_3PO_4 , NaOH y $ZnCl_2$ como agentes activante. Mientras que (Márquez, 2011) utiliza como método de activación física, el proceso de gasificación controlada, en el que la conversión del carbón no es total y resulta un sólido poroso (carbón activado).

La calidad y las características del carbón activado no solo dependen de las condiciones de preparación, sino que también influye el material de arranque.

Dentro de las materias primas utilizadas para la producción de carbones activados se encuentran los materiales orgánicos, ricos en carbono, por ejemplo: las basuras agrícolas, consideradas muy útiles por ser un residuo de los alimentos, fuentes renovables y económicas. Otras materias primas son: cortezas de almendros, turba, petróleo, brea y polímeros, nogales, palmeras u otras maderas, carbón mineral, cáscara de nuez, del coco y muchas más.

La cáscara del fruto de la *Jatropha curcas* L., es un residuo del proceso de obtención del biodiesel y estudios realizados por (Kumar, 2009) demuestran que puede ser convertida en un valuable carbón activado.

Otra materia prima que puede ser utilizada para la fabricación de carbón activado, es la madera de *Dichrostachy Cinérea* o más conocida como Marabú. Cuba posee 1500000 ha de terrenos cubiertos por esta planta y es considerada un problema para el desarrollo de la agricultura. Según (Ballesteros, 2001) el marabú puede utilizarse en la generación de electricidad y en la producción de carbón activado a la vez; mediante el proceso de gasificación controlada.

El carbón activado tiene múltiples aplicaciones en el mundo de la industria como son la extracción de la humedad del aire comprimido, la purificación del agua, tratamiento de aguas residuales o como es el caso en estudio, eliminar olores, sabores u otras impurezas del aguardiente y el alcohol.

Según lo expuesto por (Hernández, 2000), la producción mundial de carbón activado en el 1995 fue de 300000 a 400000 toneladas. El 80% de esa cantidad fue aplicada

en la fase líquida y el 20% en gaseosa. La demanda para el año 2000 fue de 806000 a 1060000 toneladas y la tasa de crecimiento de la demanda de este producto oscila entre un 7 – 10% anual.

El carbón activado que se utiliza como adsorbente en el destufado del aguardiente y del alcohol, en la entidad de CubaRon SA., es el Norit Rox-08. Este es considerado a nivel mundial como un adsorbente de alta calidad y goza de un reconocido prestigio. Es producido en Holanda y fabricado mediante un método químico-físico no descrito por el fabricante y tiene las siguientes características: Área superficial= 900m²/g, Ca= 0.02%, Fe= 0.02%, pH= 5-7, ρ=390g/L, Cenizas = 3%, Dp= 0.8mm, Humedad = 6%.

El carbón activado es un producto fundamentalmente de importación, con un costo muy elevado. Su precio en el mercado en 1998 oscilaba entre 0,7-1 \$/kg USD, alcanzando valores superiores para usos especiales y en el año 2012 se han reportado valores hasta de 19 \$/kg USD.

En la entidad de CubaRon SA. se adquiere el carbón activado Norit Rox-08 en el año 2010 a 7,3220\$/kg USD y se consume con el montaje de los filtros un total de 990kg; por lo cual el gasto total por consumo de carbón activado es de 7248, 78\$ USD; representando el 71% del costo variable total de la etapa de dilución - filtración del aguardiente.

El fabricante del Norit Rox-08 plantea que el tiempo de vida útil de este carbón utilizándolo en la filtración de aguardiente es de 2 – 3 años. Esto implica que dentro de un año aproximadamente será necesario renovar el carbón activado con el cual se empacaron los filtros en el 2010.

Por lo expuesto anteriormente se plantea como *Problema de la Investigación:*

¿Será posible sustituir el carbón activado Norit Rox-08 utilizado en la etapa de filtración del aguardiente; por carbón activado producido nacionalmente?

La actual interrogante tiene como *Hipótesis:*

Si se utilizan los carbones activados fabricados con la cáscara del fruto de la *Jatropha curcas* L. y con la madera de Marabú es posible mantener los parámetros de calidad del aguardiente.

Para el desarrollo de este trabajo se tiene como *Objetivo General:*

Evaluar la factibilidad técnica de utilización del carbón activado de cáscara de *Jatropha curca* L. (CAJC) y carbón activado de madera de marabú (CAMM) en la etapa de filtración del aguardiente.

Objetivos Específicos:

- ❖ Obtener CAJC mediante un método químico con ácido sulfúrico y CAMM por gasificación controlada.
- ❖ Caracterizar los carbones activados Norit Rox-08, CAJC y CAMM.
- ❖ Diseñar y construir un modelo de configuración semejante al filtro utilizado en la Ronera-Cárdenas.
- ❖ Determinar parámetros de calidad del aguardiente filtrado con CAMM y CAJC.

CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Para el desarrollo del presente trabajo se realiza una revisión bibliográfica y se seleccionan los principales aspectos relacionados con la temática en estudio: características generales sobre el carbón activado, materiales para su elaboración, métodos de obtención, la utilidad e influencia de estos como adsorbente en el proceso de filtración del aguardiente , así como conceptos básicos de escalado ,diseño y confección de un filtro empacado con carbón activado, los que se exponen a continuación.

1.1 EL CARBÓN ACTIVADO.

El carbón activado, o carbón activo, es un material carbonizado que se ha sometido, a reacción con gases oxidantes o bien a un tratamiento con adición de productos químicos, durante o después del proceso de carbonización, con el objetivo de aumentar su porosidad y capacidad de adsorción. Mediante el control adecuado de los procesos de carbonización y activación se puede obtener una gran variedad de carbones activados que posean diferentes distribuciones de tamaño de poros (Rodríguez, 2002).

En estudios realizados por (Oviedo, 2012) se plantea que existe una amplia variedad de carbones activados que muestran diferentes características. El mismo viene en dos variaciones: carbón activado en polvo (PAC) y carbón activado granulado (GAC) (figura 1.1 anexo1). Es un material que se identifica por poseer microporos menores de 1 nm. A causa de su alta microporosidad, un solo grano de carbón activado puede poseer un área superficial desde $500\text{m}^2/\text{g}$ hasta los $2500\text{m}^2/\text{g}$. Bajo un microscopio electrónico, su estructura superficial se muestra con gran cantidad de recovecos y de grietas (figura 1.2 anexo 2). A niveles más bajo se encuentran zonas donde hay pequeñas superficies planas tipo grafito, separadas solamente por algunos nanómetros, formando los llamados microporos. Estos proporcionan las condiciones para que tengan lugar el proceso de adsorción. Además de que el carbón activado saturado se puede regenerar mediante la aplicación de calor.

Es decir, es un término genérico que describe una familia de adsorbentes carbonáceos altamente cristalinos y con una estructura poral interna extensivamente desarrollada para aumentar la propiedad que tienen de adsorber gases o líquidos.

1.2 MATERIA PRIMA PARA LA ELABORACIÓN DE CARBONES ACTIVADOS.

(Montes de Oca, 2007; Menéndez, 2006) concluyen que prácticamente cualquier material orgánico con proporciones relativamente altas de carbono es susceptible de ser transformado en carbón activado. Los carbones activados obtenidos industrialmente pueden provenir de madera y residuos forestales u otros tipos de biomasa, turba, lignito y otros carbones minerales, así como de diferentes polímeros y fibras naturales o sintéticas. Existen, no obstante, algunas limitaciones, desde un punto de vista estructural son carbones muy desordenados e isótropos y por tanto, no serán adecuados para su elaboración aquellos materiales carbonosos que pasen por un estado fluido o pseudo-fluido durante su carbonización; dado que durante la resolidificación de esta fase suelen formarse estructuras ordenadas en los carbones resultantes. No resultan útiles, además, los carbones coquizables, salvo que se eliminen sus propiedades coquizantes mediante una oxidación previa. Del mismo modo, tampoco son usados los residuos termoplásticos. Los factores que hay que tener en cuenta para elegir un precursor adecuado son: buena disponibilidad y bajo costo, bajo contenido en materia mineral y que el carbón resultante posea buenas propiedades mecánicas y capacidad de adsorción. Los residuos de madera, las cáscaras de coco y frutos secos, así como las semillas de algunas frutas junto con los carbones minerales y el coque de petróleo, son los precursores más usados.

Se han presentado en estos tiempos diferentes estudios sobre carbones activados elaborados a partir de la cáscara del fruto de la *Jatropha curcas* L. y de la madera del Marabú.

1.2.1 La *Jatropha curcas* L. y su uso en la obtención de carbón activado.

La *Jatropha curcas* L. es originaria de Mesoamérica, pero crece en la mayoría de los países tropicales, se cultiva en América Central, Sudamérica, Sureste de Asia, India y África (Montes de Oca, 2007). En sus estudios (Openshaw, 2000) expone que la misma fue difundida en Asia y África por comerciantes portugueses como planta para cercar y hoy en día se ha expandido por el mundo entero. Esta planta pertenece a la familia de las

Euphorbeaceae, la cual es una oleaginosa de porte arbustivo que tiene más de 3 500 especies agrupadas en 210 géneros; alcanza de 3 a 6 m de altura y tiene una longevidad mayor de cincuenta años.

Es una especie perenne muy resistente a la sequía, subsistiendo con apenas 250 – 600 mm de lluvias al año y crece bien en tierras marginales. Bajo ciertas condiciones, de humedad y fertilizantes anualmente se obtiene alrededor de 30 kg de fruto/planta, de las cuales, 12 kg corresponden a la semilla y 18 kg a la cáscara. El rendimiento es de 12 ton/frutos/ha, 4,8 ton de semillas y 7,2 ton de cáscara, según estudios realizados por (Montes de Oca, 2007).

Tabla 1.1 Producción de semilla, cáscara y aceite de la *Jatropha curca* L. en los primeros 6 años del Cultivo.

Años de cultivo.	kg frutos/ha.	kg cáscara/ha	kg semilla/ha.	kg aceite.
1	740	490	250	120
2	2940	1940	1000	480
4	14700	9700	5000	2400
6	35290	23290	12000	5760

Grandes volúmenes de semillas de la *Jatropha Curca* L. son utilizadas para la producción de biodiesel, de ahí que considerables cantidades de cáscara se generan en estas industrias, material que ha despertado el interés de los productores de carbón activado. (Kumar, 2009) en sus estudios elabora diferentes tipos de éstos, mediante métodos de activación química y física. En el mismo demuestra que la cáscara de la *Jatropha Curca* L. es un material que garantiza un buen carbón activado y obtiene valores de rendimiento para cada método, donde el de mayor resultado fue el obtenido con ácido sulfúrico al 98 %. Realiza la caracterización de los mismos, analizando más de 10 propiedades y concluye que partiendo de esta materia prima cualquiera que sea el método empleado se obtiene un carbón con un área superficial elevada.

Estudios presentados por (Wimonrat, 2011) sobre la preparación de una variedad de carbones activados, donde la materia prima es la cáscara de la *Jatropha*, demostraron que el mismo es capaz de eliminar contaminantes orgánicos e inorgánicos del agua, además de otras propiedades.

1.2.2 Disponibilidad de la *Jatropha curcas* L. en Cuba.

En Cuba, a principios de la década de los 90, es que se decide estudiar este cultivo como resultado de una información recibida del proyecto que se desarrollaba en Nicaragua con ayuda de Universidades de Austria; se reportan en varias provincias una especie nativa conocida por los campesinos como Piñón de Leche o Piñón Botija, que la utilizan como cerca viva y respetan por ser su fruto tóxico (Montes de Oca, 2007). Se presenta como una planta salvaje en el país entero y las plantaciones especializadas se encuentran actualmente en el Este de la isla, principalmente para usar su aceite en la producción del biodiesel (Suárez, 2007). Según lo expuesto por (Berris, 2007) la especie desarrollada en estas tierras es capaz de crecer en tierras marginales de pobre calidad o suelos degradados, con niveles de lluvias por debajo de 300 mm por año, teniendo la capacidad de prevenir la erosión de los suelos y la desertificación.

Otra materia prima que se utiliza para la obtención de carbón activado es la madera del marabú. Un ejemplo de esto es que científicos en Escocia, liderados por el ingeniero Peter Hall de la Universidad de Strathclyde en Glasgow, descubrieron que la planta denominada marabú podría utilizarse para desarrollar, desde filtros purificadores para agua potable y ron, hasta baterías más baratas y eficientes. Peter Hall fue hasta la isla en un viaje organizado por la Agencia Internacional de Desarrollo Escocesa y trabaja actualmente en coordinación con investigadores cubanos. Según criterios planteados por (Alejandra, 2012) Hall cree que el carbón activado de marabú es una tecnología potencialmente valiosa no solo para Cuba sino para el resto de Latinoamérica.

1.2.3 El Marabú y su uso en la obtención de carbón activado.

El término marabú puede referirse al nombre vulgar de tres especies de aves del género *leptoptilos*, pertenecientes a la familia *Ciconudae* o a una planta arbustiva espinosa

africana de la familia de las leguminosas de la tribu Mimoseae que en Cuba es una plaga y recibe este nombre común.

(Méndez, 2004) plantea que la *Dichrostachy Cinérea* o más conocida como marabú es una especie de planta nativa del viejo mundo, se encuentra en África, India, Sur de Tailandia y Malasia. En el norte de Australia se le ha considerado como nativa, pero puede tratarse de otra especie. En América fue introducida en el sur de los Estados Unidos, Cuba, La Española y en las islas francesas Guadalupe, María Galante y Martinica. Se han descrito nueve subespecies y trece variedades. Lo expuesto por (Padrón, 2002) demuestra que alcanza de cuatro a cinco metros de altura y excepcionalmente en suelos propicios y húmedos puede llegar hasta los 10 m y 18 cm de diámetros. La corteza es gris, pardo grisáceo o blanquecina y la espinas solitarias gruesas y punzantes, de 1 a 2,5 cm de largo.

El marabú es una plaga indeseable e inextinguible, tiene un VCB de 3750 kcal/kg (Ballesteros, 2001).

1.2.4 Disponibilidad del Marabú en Cuba.

En Cuba solo existe una subespecie, la *Dichrostachys Cinerea* variedad ampliamente distribuida en África, se introdujo a mediados del siglo XIX, pero no se sabe exactamente cómo. Hacia 1930 ya ocupaba unas 443190 ha, en 150 años se convirtió en la planta que más prolifera en Cuba; dándose a conocer como planta invasora e indeseable. Ya a principios del XXI se encuentran invadidas 1141550 ha del territorio cubano lo que representa un 10% del mismo y un 18% de las tierras agropecuarias. Su expansiva reproducción se debe a que el ganado consume sus legumbres y disemina sus semillas con las deyecciones (Betancourt, 2000).

"Cuba ha venido invitando expertos para encontrar formas innovadoras de resolver el problema del marabú. Luego del declive de la industria azucarera tras la caída de la Unión Soviética, la maleza invadió grandes extensiones y se estima que hoy ocupa cerca de 1,7 millones de hectáreas de tierra productiva", dijo Peter Hall a BBC Mundo. Fernando Ravensberg, corresponsal de la BBC en Cuba, señala que "el marabú fue importado como

cerca natural pero con la crisis en la agricultura se extendió por los campos hasta ocupar el 50% de las tierras cultivables y Raúl Castro al asumir la presidencia lanzó una campaña de erradicación". "En Cuba el marabú simboliza el fracaso de las granjas estatales y motivó una reforma agraria que desde el 2008 repartió 1,3 millones de hectáreas entre los campesinos, los cuales se han puesto como meta eliminar completamente el arbusto de sus tierras", agregó Ravensberg; (Alejandra, 2012).

A pesar de su enorme impacto ambiental negativo resulta útil en algunos aspectos como por ejemplo: protege grandes áreas contra la erosión, sirve de refugio a especies nativas de la fauna, es fuente de alimento para el ganado fundamentalmente el ovino- caprino. Su madera es muy dura e inmune a los ataques de hongos o insectos, también se utiliza en construcción de cercas rudimentarias y puede ser fuente de biomasa para combustibles sólidos de baja densidad. Se calcula en estudios realizados por (Méndez, 2004) que con una maquinaria y el consumo de una tonelada de petróleo puede cortarse unas 800 toneladas de biomasa que equivalen a la energía de 267-400 toneladas de petróleo, 13,43 ha (1 caballería cubana), en un turno de trabajo. La leña produce un carbón natural de buena combustión de un poder calórico de 4654kcal/kg, produciendo poco humo y cenizas. Por otra parte, según (Travieso, 2003), esta constituye sin dudas la mayor reserva de energía renovable que tiene nuestro país y la gasificación una vía efectiva para su explotación como fuente de energía y de producción de carbón activado.

Peter Hall, en sus estudios plantea que el carbón activado hecho de la madera del marabú tiene un área superficial igual a 1200 m² (Alejandra, 2012).

Cuba importa cerca de ocho millones de dólares de carbón activado para usos industriales pero ahora sabemos que en su propio territorio tiene un recurso que puede ser muy útil.

1.3 MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO.

Generalmente se producen por dos métodos diferentes: activación química y activación física o del vapor.

1.3.1 Activación química.

En este tipo de activación el precursor se hace reaccionar con un agente químico

activante y suele tener lugar en una única etapa a temperaturas que pueden variar entre 350 y 900 °C. No obstante, es necesario una etapa posterior de lavado del carbón activado para eliminar los restos del agente activante y siempre que sea posible recuperar al mismo (Menéndez, 2006). Luego es secado y por último se tritura y clasifica en el diámetro de partícula deseado. En la figura 1.4 se muestra los pasos a seguir para la obtención de carbón activado mediante un método químico.

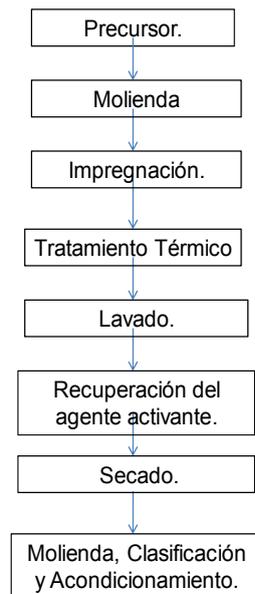


Figura 1.4 Esquema de la obtención de carbón activado mediante un método químico.

Es decir, una sustancia deshidratante, que puede ser un ácido, se mezcla con la materia prima y se somete a un tratamiento a temperatura moderada. Según (Oviedo, 2012) esta técnica debe ser aplicada cuidadosamente, por ejemplo, al usar como agente deshidratante ZnCl los residuos de Zn pueden permanecer en el producto final, aún después del lavado. La activación ácida seguida por un tratamiento termal aumenta la capacidad de adsorción, ya que se logra aumentar el área superficial y el volumen del poro.

Se encuentran varios registros oficiales de pleitos en la literatura por la preparación de carbones activados mediante el método de activación ácida. Este tipo de tratamiento puede cambiar la superficie del carbón, los grupos funcionales y la estructura del poro; en

dependencia del ácido utilizado como agente activante. Los reactivos químicos que se han utilizado en diferentes estudios son: $ZnCl_2$, H_2SO_4 , HCl , HNO_3 y otros. (Kumar, 2009).

Varios autores plantean que el método químico tiene como desventaja, que es más contaminante que el método de activación física o de vapor y esto depende también del agente activante que sea utilizado. Mientras que por otro lado, su ventaja es que se logra un mayor ahorro de energía y un rendimiento más alto, es decir, se debe valorar en conjunto los beneficios y/o perjuicios del mismo a la hora de utilizarlo.

1.3.2 Activación física o del vapor.

El material carbonizado se trata con una mezcla de gases de combustión y vapor de agua a elevada temperatura para que se active. Se lleva a cabo en dos etapas, la carbonización que elimina elementos hidrógeno y oxígeno para dar lugar a una estructura porosa rudimentaria y a la etapa de gasificación del carbonizado que se expone a una atmósfera oxidante que elimina los productos volátiles y átomos de carbono, aumentando el volumen de poros y la superficie específica, expresado esto en estudios realizado por (Oviedo, 2012). Este se lleva a cabo a temperatura entre los $700 - 1100^{\circ}C$. La activación propiamente dicha puede ser un proceso totalmente independiente de la carbonización o llevarse a cabo a continuación de ésta. Consiste en hacer reaccionar al agente activante con los átomos de carbono del carbonizado que está siendo activado; de forma que se produzca un “quemado selectivo” que va horadando progresivamente al carbonizado, generando poros aumentando su porosidad hasta transformarlo en un carbón activado. El esquema que responde a explicado se representa en la figura 1.5.

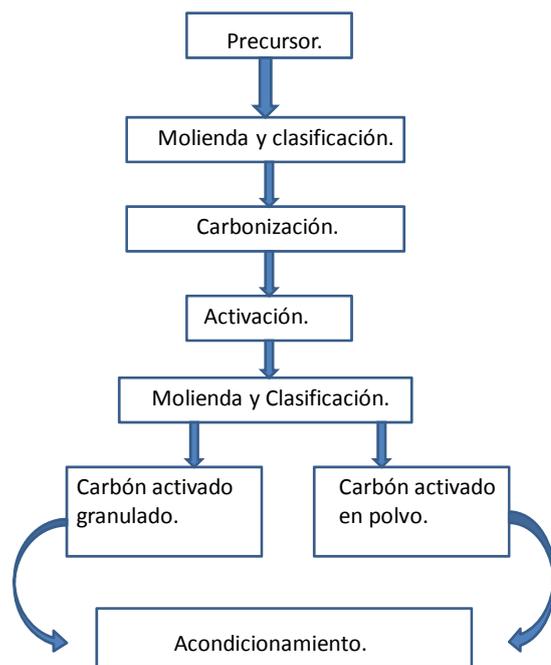
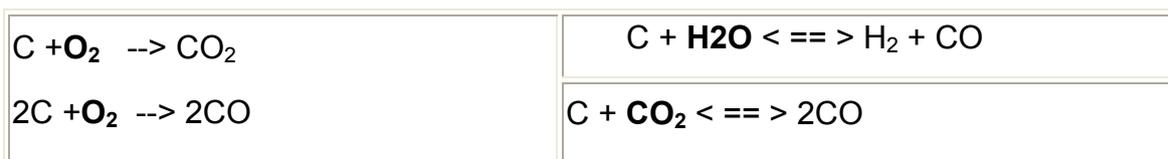


Figura 1.5 Esquema de la obtención de carbón activado mediante un método físico.

Los agentes activantes que se suelen usar son: Oxígeno (raramente a escala industrial) aire, vapor de agua (el más usado) y CO₂. Estos agentes dan lugar a las siguientes reacciones químicas que eliminan átomos de carbono produciendo así la porosidad. (Menéndez, 2006).



El proceso de gasificación es un método físico que se utiliza para la obtención de carbón activado, aunque el mismo tiene como fin la generación de energía eléctrica a partir de los gases de síntesis. La temperatura para llevar a cabo este proceso oscila entre los 900-1000⁰C garantizando las propiedades adsorptivas del carbón y un área superficial alta y bien desarrollada. Además la activación física genera menor impacto ambiental que la química, plantea (Zapata, 2005). El aspecto de gasificación tratado se refiere a la

gasificación incompleta, proceso a través del cual se obtienen los carbones activados, según estudios realizados por (Márquez, 2011).

La descomposición térmica de estos materiales biomásicos se produce a través de una serie compleja de reacciones químicas, además de procesos de transferencia de masa y calor, lo que hace difícil predecir su transcurso, pues influyen una serie de variables como son las condiciones de operación o el tipo de biomasa empleado.

Teniendo en cuenta este criterio se explica lo más simple posible según (Dougall, Mc J.S., 1991, cuales son las transformaciones que ocurren. Durante la carbonización tiene lugar la reorganización de los átomos de carbono en estructuras microcristalinas tipo grafito. A medida que aumenta la temperatura, los compuestos primarios se polimerizan e independientemente de que el material original tenga cadenas alifáticas o aromáticas, se origina un sistema planar de moléculas tipo benceno condensadas, formándose así un sólido como resultado de las uniones C-C entre planos vecinos. Desde 400 hasta 700 °C estos sistemas condensados crecen gradualmente, pero todos los átomos periféricos están unidos por enlaces químicos a átomos de hidrógeno o grupos hidrocarbonados, estas sustancias tienen alta resistividad eléctrica. Entre 700 y 800 °C, muchos de los átomos de hidrógeno y los grupos hidrocarbonados son eliminados, dejando pequeños cristalitas con estructura similar al grafito lo que coincide con una drástica reducción de la resistividad eléctrica o un mayor ordenamiento que puede ser observado por Difracción de Rayos X (XRD).

Si la carbonización se efectúa por encima de 1000 °C, la reactividad disminuye, pues se destruyen los centros activos en la superficie, el número de átomos en las aristas es reducido por reordenamiento, las dislocaciones desaparecen y los heteroátomos abandonan la estructura en gran medida por desvolatilización de compuestos de Nitrógeno y Oxígeno (Van Heek, K.H., 1991), sobre todo por debajo del 50 % de pérdida por combustión. De igual forma a altas temperaturas el proceso es rápido y el rendimiento de carbón es menor. Como plantea (Miguez, 2012) y coincidiendo con sus criterios, los factores influyentes en el rendimiento y calidad del carbón vegetal o activado son: las propiedades físicas y composición del material a utilizar, la temperatura de operación y el proceso empleado.

1.4 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS CARBONES ACTIVADOS.

El área superficial

Según (Rodríguez, 2004) es la extensión de la superficie de los poros desarrollada dentro de la matrix del carbón, se determina mediante la adsorción de nitrógeno gaseoso a 77K bajo alto vacío, es el indicador primario del nivel de actividad, asumiendo que a mayor área superficial, mayor número de puntos de adsorción disponibles. Hay por tanto un valor óptimo de superficie-microporosidad-grado de activación adecuado a cada proceso de aplicación.

Los radios porales

La determinación de la distribución de los poros es una forma extremadamente útil de conocer en el comportamiento del material, la IUPAC define la distribución de radios porales en microporos ($r < 1\text{nm}$), Mesoporos ($r \approx 1 - 2,5 \text{ nm}$), Macroporos ($r > 25 \text{ nm}$). (Menéndez, 2006) plantea que los Macroporos son los encargados de servir como vía de entrada al carbón activado, los Mesoporos realizan el transporte y los microporos la adsorción. En principio, cabría pensar que, a mayor superficie específica mejores serán las características adsorbentes del carbón activado; puesto que también debe tener un mayor número de centros para retener el adsorbato. Sin embargo, esto no siempre es cierto, pues se debe tener en cuenta el posible “efecto de tamiz molecular”. Así, dependiendo del tamaño de las moléculas del adsorbato puede suceder que éstas sean mayores que algunos de los poros y por tanto no toda la superficie sea accesible a dichas moléculas. Por otro lado también hay que tener en cuenta tanto la geometría del poro como la del adsorbato. Por ejemplo, determinadas moléculas pueden penetrar en poros con geometría del “tipo rendija” y no hacerlo en poros de dimensiones similares y geometría cilíndrica.

Por lo antes expuesto se concluye que una elevada superficie específica con una buena distribución de tamaños de poros que la hagan fácilmente accesible al adsorbato, es una condición necesaria pero no suficiente, para optimizar la preparación de un carbón activado (anexo 3, figura 1.3).

El tamaño de la partícula

(Oviedo, 2012) plantea que cuanto más fino es el tamaño de la partícula de un determinado carbón activado, mejor es el acceso al área superficial y más rápida es la tasa cinética de adsorción. Una elección cuidadosa del tamaño de las partículas puede proveer significativos beneficios operativos.

Índice del azul de metileno.

El índice del azul de metileno es una medida de la porosidad del carbón activado, mediante la adsorción del azul de metileno en solución por éste y junto al índice de yodo, es uno de los métodos más utilizado y prácticos para la caracterización de los carbones activados. Se puede observar que cuando el grado de activación es bajo, la microporosidad es tan estrecha que la superficie no está totalmente disponible para la retención del azul de metileno, por tener un tamaño molecular de 0.84 nm, mayor que el de una fracción de los microporos. La ausencia de microporos de mayor tamaño y de mesoporos hace que las cantidades retenidas de azul de metileno sean prácticamente despreciables hasta que no se alcanza el 30% de activación. Las dificultades de acceso de las moléculas de gran tamaño junto con la lentitud con la que transcurre el proceso de adsorción hacen que en la decoloración se utilice carbón muy activado en polvo, operando de manera discontinua, mientras que para eliminar fenoles se prefiera un lecho de carbón granular microporoso, por el que pasa el efluente continuamente (Rodríguez, 2002).

La densidad aparente

La densidad aparente de un material granular (ρ_a) es la masa de material correspondiente a la unidad de volumen ocupado por el mismo. Siempre es menor que la densidad de las partículas, debido a los espacios huecos existentes entre las partículas que forman el conglomerado; aunque la diferencia determinada por estudios de diferentes autores demuestran, que no es representativa. (Rosabal, 2006). La densidad aparente es muy utilizada en términos industriales, debe considerarse cuando se deban llenar volúmenes fijos, puede tener implicaciones comerciales.

La misma puede determinarse experimentalmente pesando la masa del carbón y midiendo el volumen ocupado por este, en una probeta aforada. Si se supone que la densidad del fluido alojado en los espacios huecos (aire) es despreciable en comparación con el de las partículas, el valor de densidad aparente puede calcularse mediante la expresión:

$$\rho_a = \frac{m}{V} \quad \text{Ec.1.1}$$

Donde: (m- masa del material, V- volumen ocupado por el material pesado).

1.5 USOS DEL CARBÓN ACTIVADO EN LA FILTRACIÓN DE AGUARDIENTE.

En la industria química el carbón activado por su capacidad de adsorción, es uno de los adsorbente más utilizado hasta el momento. (Oviedo, 2012) expone que son de utilidad para quitar vapores de aceites, sabores, olores y otros hidrocarburos del fluido que se desee filtrar.

Desde el punto de vista medioambiental y muy ligado a la industria química, (Miguez, 2012) plantea que es útil en la eliminación de contaminantes del aire, como de flujos de agua implicados en los procesos industriales.

Su uso en la filtración del aguardiente, según (Falconi, 1997), juega un papel importante, pues es uno de los factores que influyen en la calidad del mismo, además de la caña, la fermentación y la destilación. El material adsorbente utilizado, elimina sustancias no deseadas, las cuales agregan olores y sabores un tanto desagradables, que afectan directamente el bouquet del aguardiente.

1.5.1 Parámetros de calidad del aguardiente.

Según (Muñoz, 1996) se entiende por aguardiente, todas las bebidas alcohólicas de alta graduación, secas o aromáticas, obtenidas por destilación de mostos o pastas fermentadas, pueden ser de granos, caña, papa u otros. Esta palabra se deriva del término latín "agua ardens" con el que designaban al alcohol obtenido por medio de la destilación.

Uno de los aguardientes simples, es el aguardiente de caña de azúcar el cual se obtiene de subproductos de la industria azucarera o bien directamente del jugo de la caña (Cordoví, 1988). Este ha formado parte de la composición del ron cubano que nos ha representado a nivel internacional durante siglos, el cual ha ganado prestigio y reconocimientos por su buen bouquet, gracias a ese sabor característico que aporta el aguardiente de caña.

Dentro de los principales parámetros de calidad del aguardiente se encuentran: el grado alcohólico, la acidez total, las características organolépticas y la apariencia.

Según las normas cubanas (NC 290: 2007, NC 291: 2009 y el Procedimiento Analítico de Evaluación Sensorial (PAES)) referentes a este producto, establece que la apariencia después del filtrado debe ser limpia e incolora, que no deben detectarse aromas, ni sabores extraños a la naturaleza del aguardiente, por otra parte que la acidez total expresada en gramos de ácido acético por 100 L de muestra debe ser como máximo igual a 3 y que el grado alcohólico debe encontrarse entre 54-55 °GL.

1.6 CONCEPTOS BÁSICOS DE ESCALADO, DISEÑO Y CONFECCIÓN DE UN FILTRO EMPACADO CON CARBÓN ACTIVADO.

El escalado se hace modificando un resultado medido por un factor que involucra, entre otras cosas, la relación de las dimensiones lineales del modelo y el prototipo. (Brizuela, 1985) plantea que para llevar a cabo un escalado se combinan diferentes técnicas que van desde el análisis matemático hasta la comparación de las correlaciones existentes de los resultados obtenidos del modelo experimental, incluyendo los experimentos a escala pequeña. Dentro de los métodos de escalado varios autores plantean como principales a: el Principio de Similitud, el Modelos y "Mckups" y la Modelación Matemática.

El Principio de Similitud o de Semejanza involucra las relaciones entre sistemas de diferentes tamaños. La similitud se representa generalmente por grupos adimensionales, que caracterizan los fenómenos del proceso y que permanecen constantes durante el escalado. (González, 2005).

En la ingeniería química se utilizan cuatro tipos de similitudes: geométrica, mecánica, térmica y química.

Criterio de similitud geométrica: se supone que existen dos cuerpos cuyos puntos son correspondientes si sus coordenadas espaciales están relacionadas similarmente o sea:

$$\frac{x}{xi} = \frac{y}{yi} = \frac{z}{zi} = le \quad \text{Ec.1.2}$$

Donde: *le* - relación lineal de escala.

Por otra parte se tiene que según (Granger, 1967) la filtración es la operación en la que una mezcla heterogénea de un fluido y de las partículas de un sólido, se separa en sus componentes, gracias al curso de un medio filtrante que permite el paso del fluido, pero retiene a las partículas de sólido. Esta operación implica, por tanto, el flujo de fluidos a través de medios porosos y se efectúa en los aparatos denominados filtros, estando estrechamente relacionada con el fenómeno de adsorción.

La adsorción corresponde a la transferencia de una molécula de la fase líquida hacia la fase sólida. Este fenómeno obedece a las leyes de equilibrio entre la concentración en fase líquida y la concentración en fase sólida, sobre la superficie del material adsorbente. (Glasstone, 1968).

(Kasatkin, 1987) explica que, la adsorción de un soluto se efectúa según una sucesión de cuatro etapas cinéticas:

- Transferencias del soluto desde el seno de la fase líquida hacia la película líquida que rodea el adsorbente. Esta transferencia se hace por difusión y/o convección.
- Transferencia del soluto a través de la película líquida hacia la superficie del adsorbente. Caracterizada por el coeficiente de transferencia de masa global externa (K_f), parámetro inversamente proporcional a la resistencia ejercida por la película externa a la transferencia de masa. El espesor de esta película externa, δ , y K_f dependen de las turbulencias existentes en el interior de la fase líquida.

- Difusión del soluto en el grano, bajo los efectos del gradiente de concentración. Esta difusión puede hacerse: en estado libre, en el líquido intraparticular (el coeficiente de difusión porosa, D_p , caracteriza esta migración); o en estado combinado, de un sitio de adsorción a otro adyacente (el coeficiente superficial, D_s , es específico de esta etapa). Algunos autores no establecen una diferencia entre estos coeficientes y los agrupan en uno solo, D_{efc} , Coeficiente de Difusión Efectiva.
- Adsorción propiamente dicha. Este fenómeno corresponde al sistema de más baja energía y se caracteriza por las interacciones soluto-soporte, que pueden ser de dos tipos: la adsorción física (fisiosorción) que se basa en las fuerzas intermoleculares débiles (Van der Waals o electrostática), cuyos efectos son reversibles, y la adsorción química (quimiosorción) que se basa en las fuerzas de naturaleza covalente, cuyos efectos son casi siempre irreversibles. La existencia de tales enlaces supone la presencia de sitios reactivos. Siempre intervienen simultáneamente los dos fenómenos, pero la fisiosorción parece ser el mecanismo preponderante.

Estas etapas se efectúan en serie siendo la más lenta la que impone la cinética. Para la mayoría de los autores, las etapas uno y cuatro son rápidas; por lo tanto, es la transferencia de masa a través de la película y de difusión en el interior del grano (superficial y poroso) las que controlan la cinética de adsorción. Por lo que la velocidad de adsorción está condicionada a la velocidad del fluido a través de la cama (Granger, 1967).

Según (González, 2005) los coeficientes de transferencia de masa (K_f , K_s y K_{fa}), para los diferentes mecanismos se presentan de modo semejante a otras operaciones de transferencia de masa en sistemas fluido-sólido. La expresión para determinar K_{fa} es:

$$\frac{\partial C_{as}}{\partial t} = \frac{K_{fa}}{1-\varepsilon} (C_a - C_a) \quad \text{Ec.}$$

1.3

El coeficiente de transferencia de masa global (K_{fa}) se relaciona con los coeficientes de transferencia de masa locales (K_f en la fase del fluido y K_s en la fase sólida), por medio de la expresión:

$$\frac{1}{K_{fa}} = \frac{1}{K_f} + \frac{1}{m \cdot K_s \cdot (-\varepsilon)} \quad \text{Ec. 1.4}$$

Donde: C_a -concentración de A en la fase del fluido, C_{as} – concentración de A en la fase sólida, C_a - concentración de la fase del fluido que se encuentra en equilibrio con el sólido, ε – fracción desocupada del lecho (porosidad) y m – pendiente que se obtiene a partir de la isoterma de equilibrio.

Estos coeficientes se pueden predecir para los lechos rellenos usando los métodos que se relacionan en dicha bibliografía, correlacionados en términos del factor j de Chilton y Coulburn. En la literatura consultada (González, 2005) plantea que, una de las expresiones que resumen la mayor parte de los datos experimentales que se obtuvieron antes de 1977, para la transferencia de masa entre partículas y fluidos en lechos fijos, fueron reanalizados y correlacionados por Dwiredi. Proponiendo una correlación sencilla, tanto para gases como para líquidos, en lechos rellenos en términos del factor j .

$$\varepsilon j = \frac{0,765}{Re^{0,82}} + \frac{0,365}{Re^{0,386}} \quad \text{Ec.1.5}$$

El número de Reynolds, en la ecuación anterior, se extrae en términos de velocidad superficial como:

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot D}{\mu} \quad \text{Ec. 1.6}$$

Su ecuación es válida en el rango de $0.01 < Re < 15000$ y correlaciona datos con una desviación media de 17.95%.

Por lo antes expuesto, se designa al número de Reynolds como régimen de cambio para el caso en estudio.

La revisión de literatura actualizada y de textos básicos permite concluir para el siguiente estudio que:

CONCLUSIONES PARCIALES.

1. La cáscara del fruto de la *Jatropha curca* L. y la madera del Marabú pueden ser convertidos física y/o químicamente en carbones activados.
2. El índice de azul de metileno es una propiedad de los carbones activados que indica el grado de activación y el poder de adsorción de estos.
3. En el proceso de filtración del aguardiente, el carbón activado utilizado como adsorbente influye en la calidad del mismo.
4. Haciendo uso del Principio de Semejanza y del número de Reynolds como régimen de cambio, se puede diseñar y confeccionar un modelo similar al filtro utilizado en la Ronera de Cárdenas.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.

Cuba cuenta con recursos valiosos que deben ser estudiados y experimentados porque pueden ser la solución a problemas existentes en diferentes industrias. El trabajo coordinado de las universidades, con esas entidades, se ha convertido en una opción válida para cumplir estos objetivos. Un ejemplo es el caso estudio que aquí se expone, el que se realizó de conjunto con la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, La Ronera Cuba Ron del municipio de Cárdenas y la Estación Experimental de Pastos y Forrajes: “Indio Hatuey”. Entre todos generosamente aportaron los materiales, métodos investigativos y recursos necesarios para llevar a cabo con éxito el presente trabajo.

Para el cumplimiento del Objetivo General son desarrolladas las siguientes etapas:

- Obtención de los carbones activados: CAJC y CAMM.
- Caracterización de los carbones activados: CAJC y CAMM.
- Diseño y confección del filtro de cama fija a escala piloto.
- Determinación de los parámetros de calidad del aguardiente.

La metodología a seguir, para lograr lo antes expuesto es descrita a continuación.

2.1 CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO TECNOLÓGICO.

La Corporación Cuba Ron SA., tiene un total de 5 fábricas de ron o Roneras; ubicadas en los siguientes territorios: Villa Clara, que es la central, Santiago de Cuba, Santa Cruz del Norte, San José que es mixta y Cárdenas ubicada en la zona norte del municipio, en el Consejo Popular de la Marina. Esta última es la de menor volumen de producción, con un plan anual de 720000 L.

2.1.1 Descripción del proceso de fabricación de rones.

La descripción del proceso tecnológico de la fabricación de rones permite un mejor entendimiento de la etapa en que se realiza el estudio y del equipo que se diseña y confecciona posteriormente. En la figura 2.1 se muestra el diagrama de flujo del proceso.

Aguardiente fresco

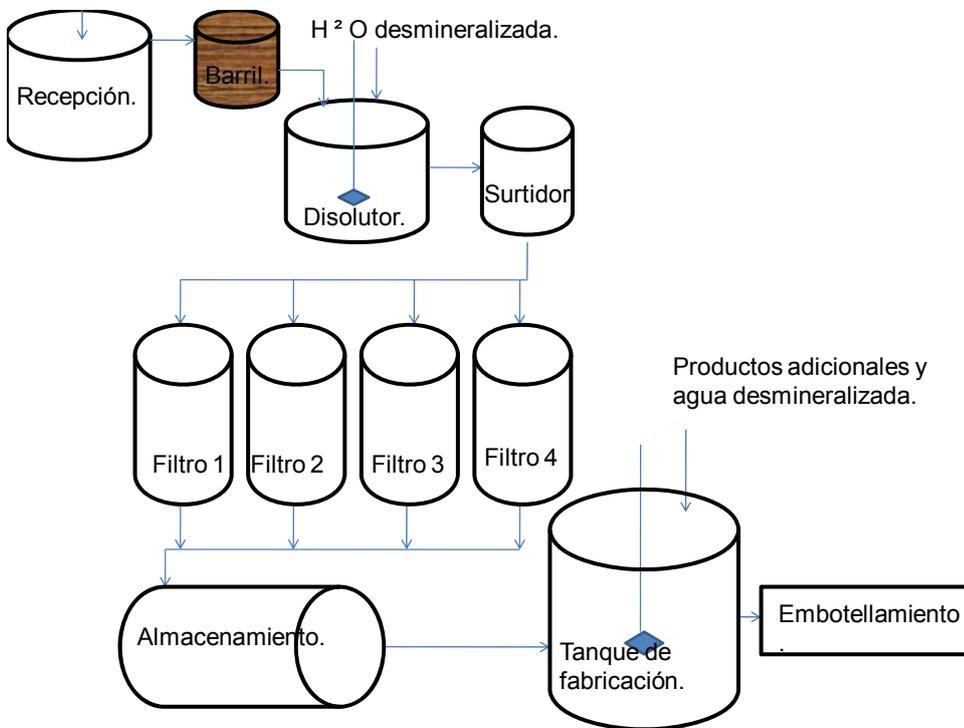


Figura 2.1 Diagrama de flujo del proceso de fabricación de los rones.

Como se aprecia el proceso consta de nueve etapas fundamentales:

1. Recepción: Esta etapa tiene como objetivo recepcionar el aguardiente fresco con 75 °GL. Se toman muestras y según la norma cubana NC 291 del 2009 debe garantizarse que la acidez total expresada en gramos de ácido acético por cien mililitros de muestra del aguardiente fresco recepcionado no sea mayor de 3.00. Se utiliza para la recepción un tanque de acero inoxidable con capacidad de 10000 L.
2. Añejamiento. El aguardiente recepcionado se deposita en barriles de madera con capacidad de 180 L y se deja añejar por un tiempo el que depende del ron que se vaya a fabricar posteriormente. Para el caso en estudio se utiliza aguardiente añejo de seis meses, el cual se utiliza en la fabricación del caldo 70.

3. Dilución. La etapa de dilución tiene como objetivo disminuir el grado alcohólico del aguardiente añejo que entra a 75-76 GL. Se mezcla el aguardiente añejo con agua destilada hasta alcanzar un valor de 54-55 GL. Esta operación se lleva a cabo en un tanque mezclador-disolutor con agitador mecánico, de capacidad de 11000 L. Se toma muestra del aguardiente a 54-55 GL y se comprueba el grado alcohólico según la norma cubana NC 290 del 2007.
4. Filtración. Esta etapa se conoce comúnmente por los trabajadores como destufado del aguardiente. Es la de mayor importancia pues en ella se eliminan las impurezas, olores y sabores no deseados del aguardiente. El mismo se pasa por cuatro columnas de filtración empacadas con carbón activado Norit Rox-0.8. Los filtros son de acero inoxidable con 0.7 m de diámetro y 2.30 m de altura. En su interior tienen un empaque de carbón activado con altura igual a 1.6 m, apoyado por un soporte de vidrio triturado de 0.20 m de altura. A la salida de los filtros se toman muestras a las cuales se le determina el grado alcohólico, acidez total y pruebas sensoriales según las normas establecidas. El grado alcohólico en el aguardiente no debe variar entre la entrada y la salida del filtro y debe ser de 54-55 GL. La acidez total expresada en gramos de ácido acético por cien mililitros de muestra varía en dependencia del tiempo de añejamiento del aguardiente y no existen valores normados de esta, pero la norma establece que la diferencia entre el valor de la entrada y salida del filtro no debe ser mayor de 5. La evaluación sensorial del aguardiente a la salida del filtro se realiza a partir de un patrón y se evalúa de forma cualitativa y cuantitativamente por un panel sensorial de cinco personas.
5. Almacenamiento. Tiene como objetivo esta etapa, almacenar el aguardiente filtrado. Se utiliza para esto un tanque con capacidad de 10000 L, el cual recibe el aguardiente que proviene de los 4 filtros.
6. Fabricación. Esta es una etapa que depende del tipo de ron que se desee elaborar. En ella se realizan las mezclas y adiciones de productos necesarios para obtener un ron determinado. Es un área reservada y de estricto cuidado. Se realiza en los tanques de fabricación con 12000 L de capacidad.
7. Ajuste del grado alcohólico. Esta etapa tiene como objetivo ajustar el grado alcohólico del ron fabricado. Se lleva a cabo adicionando agua desmineralizada al ron y agitándose continuamente la mezcla. Equipo utilizado: tanques de fabricación.

8. Reposo. Tiene como objetivo evitar el golpe alcohólico y el picor. Se deja en reposo la mezcla hidroalcohólica durante una hora. Equipo utilizado: tanques de fabricación.
9. Embotellamiento. Esta etapa no será descrita, porque es considerada por la empresa como otro proceso que responde a un nuevo diagrama de flujo. Sí saber que el objetivo principal es embotellar el ron fabricado con la calidad requerida.

2.2 OBTENCIÓN DE LOS CARBONES ACTIVADOS.

Se explica la metodología utilizada para obtener carbón activado de la cáscara de la *Jatropha curca* L. y de la madera del Marabú a través de métodos químico y físico, respectivamente.

2.2.1 Muestreo y preparación de la muestra.

Las muestras de cáscaras y madera son amablemente donadas por la Estación Experimental de Pastos y Forrajes: "Indio Hatuey" del municipio de Perico, Matanzas.

Las cáscaras de los frutos de la *Jatropha curcas* L., se secan al sol y su humedad se determina según lo planteado por Sluiter A., *et al.*, (2003a). Las mismas se limpian, retirándole los pedacitos de semillas, ramitas u otros residuos, de forma manual.

La madera del marabú se trocea de forma mecánica, se seca también al sol y se utiliza un sensor marca Stanley para determinar su humedad.

El aguardiente utilizado para el estudio fue generosamente donado por el departamento de fabricación de ron, de la entidad Cuba Ron-SA, Cárdenas.

2.2.2 Obtención de carbón activado de la cáscara de la *Jatropha curcas* L. mediante un método químico con H₂SO₄.

Para elaborar el carbón activado a partir de la cáscara del fruto de la *Jatropha curcas*, se pesan 115 g de la misma y se embebe en 250 mL de H₂SO₄ concentrado al 98% de densidad igual a 1.84 g/mL, (relación sólido-líquido= 1:4 en peso del ácido), agitándola hasta obtener una mezcla homogénea. Esta mezcla se sitúa en estufa (AISET® YLD-6000 P\G2007ba, R.P. China), a una temperatura de 185±3 °C, durante 24h. El material obtenido, ya carbonizado, se lava ocho veces con agua destilada y se sumerge en una solución de Na₂HCO₃ al 5% durante 16h, para remover los ácidos residuales.

Luego se lava 5 veces más con agua destilada y se pone a secar en la estufa a 105 °C por 8 h (Kumar, 2009). El material carbonizado se tritura y tamiza a un tamaño de diámetro de partícula igual a 0,8 mm. El carbón obtenido se nombra como, carbón activado de cáscara de *Jatropha curcas* (CAJC). Figura 2.2.

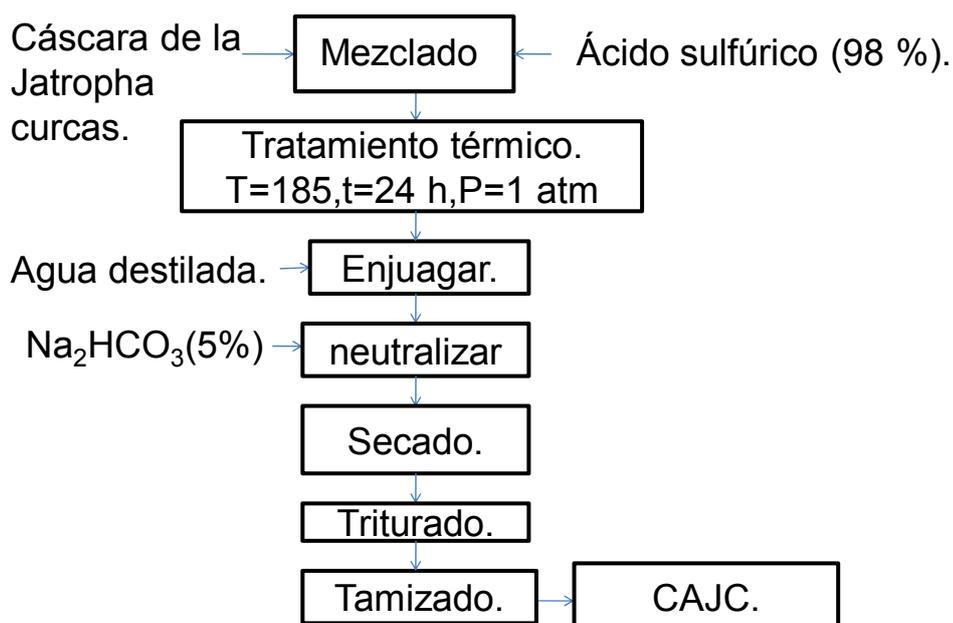


Figura 2.2 Esquema de la obtención del CAJC.

2.2.3 Obtención de carbón activado de la madera del Marabú mediante un método físico (gasificación controlada).

El proceso de gasificación controlada de la madera, tiene como función principal la obtención de energía eléctrica, obteniéndose como residual agua y un sólido carbonizado, siendo este último objeto de estudio del presente trabajo.

El reactor utilizado fue el gasificador de biomasa y su grupo electrógeno de 20 kW que se encuentran situado en la Estación Experimental de Pastos y Forraje “Indio Hatuey (EEPF-IH), municipio de Perico, Matanzas.

Se determina la humedad de la madera, ya que la misma no debe exceder del 15 %. Se

toma 75 kg de madera y se introduce al reactor por la parte superior, durante 2:15 h. El residuo obtenido es un material carbonizado, que se seca en la estufa a 105 °C por 8 h. Posteriormente se tritura y tamiza hasta un diámetro de partícula igual a 0,8 mm. El mismo se limpia con vapor de agua a 151°C, con el objetivo de eliminar gases residuales. El carbón activado obtenido es llamado en lo adelante: carbón activado de la madera de Marabú (CAMM).

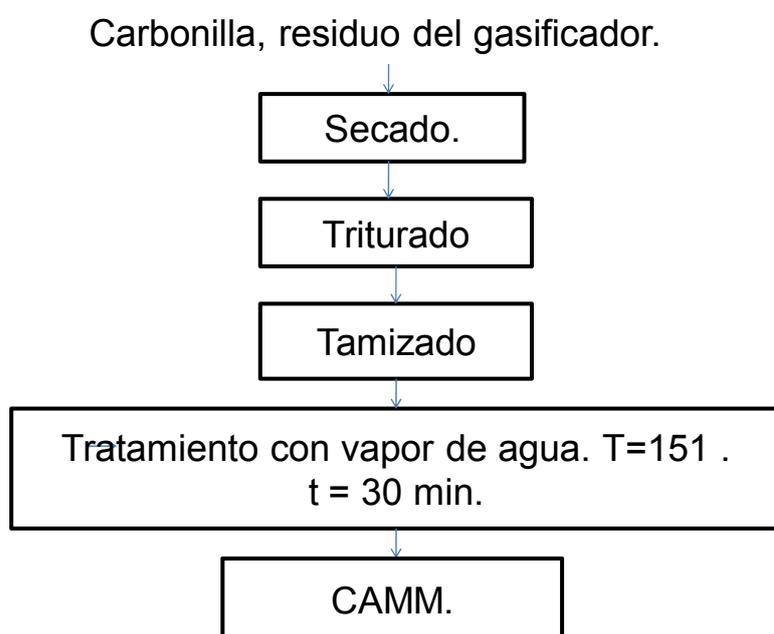


Figura 2.3 Esquema de la obtención del CAMM.

La selección de este tipo de biomasa se basa en su alta eficiencia energética, (Ramírez 2011), objetivo fundamental del proceso de gasificación. Además, su gran disponibilidad constituye la mejor fuente a utilizar y su uso garantiza la limpieza de terrenos infectados con esta plaga.

2.2.4 Porcentaje de rendimiento de los métodos utilizados en la obtención de los carbones activados: CAJC y CAMM.

El porcentaje de rendimiento para cada método de obtención se determina según la expresión:

$$\%Rend = \frac{m_f}{m_i} * 100 \quad \text{Ec. 2.1}$$

Teniendo en cuenta que:

$$m_i = mh * (ST/100) \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde: m_f – masa seca final, m_i – masa seca inicial, mh – masa húmeda pesada y ST – porcentaje de sólidos totales.

2.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS CARBONES ACTIVADOS: CAJC Y CAMM.

Para llevar a cabo esta etapa se tienen en cuenta algunas de las características generales de los carbones activados que permiten evaluar su calidad y poder de adsorción.

2.3.1 Determinación de Humedad.

La humedad de las muestras se determinan por gravimetría ($T=105\pm 3^\circ\text{C}$), haciendo uso de una estufa (AISET® YLD-6000 P\G2007ba, R.P. China) y una balanza analítica (Sartorius BP 615, Alemania), según lo planteado por Sluiter A., *et al.*, (2003a). El contenido de sólidos totales y de humedad se calcula utilizando las siguientes expresiones:

$$ST = \frac{(MS+MC)-MC}{MH} * 100 \quad \text{Ec.2.3}$$

$$H = \frac{1-(MS+MC)-MC}{MH} * 100 \quad \text{Ec.2.4}$$

Donde: (H- porcentaje de humedad; MS-Masa de la muestra seca; MC-Masa de cristalería; MH-Masa de la muestra húmeda).

2.3.2 Determinación de Cenizas.

La determinación de cenizas se realiza con el objetivo de cuantificar el contenido de componentes minerales presentes en la muestra. Para ello, la muestra se introduce en un horno o mufla (YUP XIN® SX2, R.P. China) a 550 °C para incinerar, convirtiéndola en cenizas. Posteriormente se coloca en desecadora con el objetivo de atemperar la muestra y se pesa en balanza analítica (Sartorius BP 615, Alemania). El método se repite hasta lograr peso constante con una precisión de +/- 0,005 (Sluiter A., *et al.*, 2003b). El contenido de cenizas (C) se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$C = \frac{W_2}{W_1 * \left(\frac{ST}{100}\right)} * 100$$

Ec.2.5

Donde:(W_1 -masa inicial de la muestra, W_2 - masa de cenizas, C – porcentaje del contenida de cenizas).

2.3.3 Determinación de la densidad aparente.

Para la determinación de la densidad aparente se toman siete muestras de cada carbón activado, se pesan en balanza analítica y se divide esta masa entre el volumen ocupado por las mismas en una probeta aforada (Rosabal, 2006).

La densidad aparente, siempre muestra un valor menor al de la densidad real de partículas, debido a la película de agua situada entre las partículas del carbón activado aunque la diferencia entre ambas no es representativa, según estudios de diferentes autores (Rosabal, 2006).

2.3.4 Determinación del índice de azul de metileno.

El índice de azul de metileno permite establecer una comparación entre cada carbón en estudio, donde se mide la cantidad de miligramos de azul de metileno adsorbido por gramo de carbón (índice de azul de metileno) y el porcentaje de adsorción. También es el parámetro que permite determinar si en la superficie del carbón hay formación de microporos y en qué grado. Este análisis se realiza según (Kumar, 2009).

Se toma una muestra y dos réplicas de los carbones activados en estudio: Norit Rox 08, CAJC y CAMM, con un peso de 1g cada uno. Las cuales se mezclan y agitan en una solución de azul de metileno a una concentración exacta de 5,03 mg/L, determinada por una curva patrón.

Las disoluciones se dejan en reposo, tomándose una porción de ellas a diferentes intervalos de tiempo, filtrándolas y midiendo la absorbancia del azul de metileno en un espectrofotómetro (spectrophotometer de UV-Vis Alemania) a 663 nm. Se realizan las primeras 12 lecturas cada 20 minutos, luego se deja 12h en reposo y se repite la lectura cada 20 minutos, tres veces más. Las lecturas se realizan hasta alcanzar el equilibrio.

Las cantidades adsorbidas por cada carbón se calculan a partir de las concentraciones final e inicial del azul de metileno en la disolución. Se toma como concentración final la concentración de equilibrio. Se determina el porcentaje de adsorción según la expresión:

$$\%Ads. = \frac{C_i - C_e}{C_i} * 100 \quad \text{Ec. 2.6}$$

Donde (C_e - es la concentración de equilibrio de la disolución y C_i , concentración inicial).

2.4 DISEÑO Y CONFECCIÓN DE FILTROS EMPACADOS CON CARBÓN ACTIVADO.

Se realizan, a escala inferior, dos modelos de filtros de configuración semejante al utilizado en la industria. Unidades primarias de investigación que permiten confirmar o rechazar la utilidad de los carbones activados en el destufado del aguardiente.

El primer modelo se utiliza para estudiar, a nivel de laboratorio, la influencia de los adsorbentes: CAJC, CAMM y Norit Rox-08, sobre la acidez total del aguardiente determinándose, la altura mínima de empaque con que se obtiene el valor normado.

El segundo modelo se diseña y confecciona a partir del prototipo industrial, haciendo uso del Principio de Semejanza.

En este se determinan los parámetros de calidad (grado alcohólico, acidez total y pruebas sensoriales) del aguardiente añejo de seis meses, filtrado con el carbón activado seleccionado, según los resultados obtenidos del primer modelo.

La evaluación sensorial es un parámetro que requiere de mucho volumen de aguardiente para poder realizarse, razón por la cual se realiza en este segundo modelo y no en el primero.

2.4.1 Confección de seis mini-columnas de vidrio empacadas con los carbones: CAJC, CAMM y Norit Rox-08 (primer modelo).

Se montan seis columnas de vidrio con un diámetro de 25mm y en la parte inferior tienen una válvula que permite controlar el flujo. Se rellenan a una altura de carbón de 9cm cada una. Se pasa por las columnas agua destilada y después alcohol a 55 GL, con el propósito de lavar los carbones activados en estudio. Luego el aguardiente a 54,5 GL es pasado también por las columnas hasta lograr eliminar la diferencia de grado alcohólico entre la entrada y la salida. Posteriormente se toman las muestras para determinar la acidez total expresada en gramos del ácido mayoritario por 100 L de muestra; según la NC 291-2009. A partir de estos resultados se aumentó o disminuyó la altura del empaque de carbón, buscando determinar el valor de altura mínimo que garantice la acidez normada (3,00) para aguardiente fresco.

2.4.2 Diseño y confección de un filtro empacado con carbón activado (segundo modelo).

Haciendo uso de los resultados obtenidos del primer modelo y tomando uno de los filtros de la fábrica como prototipo, se diseña y confecciona el segundo modelo. Los materiales de construcción utilizados son de iguales características al de los filtros utilizados en la industria. El cuerpo es de acero inoxidable y el soporte de la cama de carbón es de vidrio triturado. La parte superior es tapada y por debajo tiene una válvula que permite regular el flujo.

Para construir el segundo modelo se utiliza el Principio de Semejanza haciendo uso del criterio de similitud geométrica y el concepto de régimen (Brizuela, 1987).

Para el caso en estudio la expresión utilizada es:

$$\frac{D}{D'} = \frac{h}{h'} = le \quad \text{Ec.2.7}$$

Donde: D y D' son los diámetros del modelo y prototipo, h y h' las alturas de la cama de carbón del modelo y prototipo, *le* - factor de escala.

Es la transferencia de masa a través de la película y de difusión en el interior del grano (superficial y poroso) las que controlan la cinética de adsorción por lo que la velocidad de ella, está condicionada a la velocidad del fluido a través de la cama de carbón activado (Granger, 1967), entonces se digna al número de Reynolds como régimen de cambio para este caso.

2.5 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUARDIENTE FILTRADO.

Se determinan los parámetros que según las normas cubanas son de carácter obligatorio para evaluar la calidad del aguardiente a utilizar en el proceso de fabricación de rones.

2.5.1 Medición del Grado Alcohólico.

Este análisis se lleva a cabo según la NC 290: 2007. La cual establece el método de ensayo para determinar el grado alcohólico en alcoholes, aguardientes, bebidas alcohólicas preparadas o destiladas, vinos y cocteles.

El mismo se realiza las veces necesarias hasta desaparecer las diferencias de grado alcohólico entre la entrada y la salida del filtro y hasta alcanzar entre 54-55 GL.

En una probeta adecuada al tamaño del alcoholímetro y a la cantidad de la muestra, se vierte el destilado, enjuagando la probeta primero con un poco del mismo. Se introduce el alcoholímetro cuidadosamente junto con el termómetro. El alcoholímetro debe flotar libremente. Se aconseja que esté separado de las paredes de la probeta $\pm 0,5$ cm. Estabilizar la temperatura y eliminar las burbujas de aire. Efectuar la lectura de ambos.

La lectura se realiza a temperaturas diferentes de 20 °C (293 °K), por lo que se hace la corrección según la tabla del (Anexo B, normativo) de grado alcohólico para la temperatura a 20 °C.

2.5.2 Determinación de acidez total.

Este análisis se lleva a cabo según la NC 291: 2009. La misma establece el método de ensayo para determinar la acidez total en bebidas alcohólicas destiladas, alcoholes, aguardientes, vinos, bebidas alcohólicas preparadas y cocteles.

El método se basa en la neutralización de las funciones ácidas totales titulables del producto (excepto el ácido carbónico y el anhídrido sulfuroso), mediante la adición de un hidróxido alcalino, en presencia de un indicador de neutralización, cuyo cambio de color evidencia el punto final de la reacción.

Para bebidas alcohólicas destiladas, aguardiente y alcohol se realiza de la siguiente manera:

En un frasco cónico de 500ml se vierten 250ml de agua destilada, se le añaden 2 ó 3 gotas de solución indicadora de fenolftaleína al 1 % y se neutraliza con hidróxido de sodio 0,01 mol/L; a esta agua neutralizada se le agregan con pipeta 25ml de la muestra (en los casos que se produzca una solución tan oscura que no se aprecie el punto de viraje puede disminuirse el volumen de muestra hasta un mínimo de 10) y se valora con solución de hidróxido de sodio 0,01 mol/L, hasta color rosado, similar al alcanzado durante la neutralización del agua.

Expresión de los resultados

El contenido de acidez total de la muestra (A) expresada en g del ácido mayoritario (ácido acético) por 100 L de muestra se calcula por la fórmula siguiente:

$$Atm = \frac{V1*N}{V2} * E \quad \text{Ec. 2.8}$$

Donde: Atm - Acidez total de la muestra expresada en g del ácido mayoritario /100 L de muestra.

V1 - Volumen de la solución de hidróxido de sodio en litros

N-Normalidad de la solución de hidróxido de sodio

V2 - Volumen de la porción de ensayo en litros

E - Factor que considera el equivalente gramo del ácido mayoritario multiplicado por 1000 cuyo valor es para:

Ácido acético = 6000

Ácido tartárico = 7500

Ácido cítrico = 7000

2.5.3 Evaluación Sensorial.

El Procedimiento Analítico de Evaluación Sensorial (PAES) se basa en la evaluación de los defectos de cada uno de los atributos que conforman cada una de las características organolépticas, mediante escalas estructuradas de 5 puntos.

La evaluación se realiza en un modelo elaborado por familia de producto, teniendo en cuenta la ficha descriptiva correspondiente para el que se esté analizando.

La puntuación se obtiene mediante la calificación que merece cada atributo de acuerdo al tipo de defecto y la intensidad con que se percibe. Los defectos se clasifican considerando el grado de afectación que producen a una intensidad prefijada. (Tabla 2.1 anexo 4).

La puntuación promedio más baja obtenida por algún atributo influirá decisivamente en la calificación final.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y RESULTADOS.

En este capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos según la metodología planteada en el capítulo anterior. Se analiza el rendimiento de cada método utilizado para la obtención de carbón activado. Se compara el poder de adsorción de los carbones activados: CAJC y CAMM; con el Norit Rox-08. Además se determina técnicamente a partir de la evaluación de los parámetros de calidad del aguardiente, cuál de los carbones en estudio es de utilidad en la etapa de filtración.

3.1 ETAPA DE OBTENCIÓN DE LOS CARBONES ACTIVADOS: CAJC Y CAMM.

Se analiza para cada método de obtención aquellos aspectos de interés que son propios de cada uno e influyen en el porcentaje de rendimiento de estos.

CAJC.

Para el caso del CAJC el cual se obtiene por un método químico con ácido sulfúrico, es el primer carbón activado hecho en Cuba utilizando este tratamiento y la cáscara del fruto de la *Jatropha curcas* L. como materia prima principal según consulta del estado del arte sobre el tema.

El método químico empleado en la elaboración de CAJC, reporta un rendimiento del 53,6%, coincidiendo con (Kumar, 2009), quien obtiene en sus estudio un 50 % de rendimiento, haciendo uso del mismo método aquí empleado y la misma materia prima.

Los métodos de activación química logran un mayor aprovechamiento de la materia prima pero tienen como desventaja, que son más contaminantes y costosos dependiendo del agente químico utilizado.

CAMM

En la gasificación controlada a una temperatura alrededor de 900⁰C se produce con 75 kg de madera un total de 66.2 kW y 8 kg de residuo carbonoso. En este método físico el rendimiento es de un 12.4 %, valor a tener en cuenta si se conoce que es un residuo del proceso.

El reactor o gasificador a su máximo rendimiento (98,8%), utilizando como biomasa el marabú, produce 80.8 kW y 0,9 kg de residuo carbonoso para un total de 75 kg de madera según estudios realizados por Ramírez, 2011 ,por lo que si se tiene en

cuenta que el carbón activado tiene un costo elevado en el mercado y que la diferencia energética (14.6 kW) entre un rendimiento y otro no es elevada, es entonces importante considerar la alternativa de producir energía y carbón activado a su vez, con el proceso de gasificación controlada; coincidiendo con estudios realizados por Hall, 2011, quien plantea que la obtención de carbón activado de marabú por gasificación, es una tecnología potencialmente valiosa no solo para Cuba, sino para el resto de Latinoamérica.

Desde el punto de vista medioambiental tiene como ventaja que disminuye las emisiones de gases con efecto invernadero a la atmósfera.

Por otra parte, según un ejemplo de Ramírez 2011, para la generación de 3 000 kWh en el gasificador, trabajando a razón de un 98,8% de rendimiento, se utilizan 2412 Kg de marabú lo cual se puede cortar con 4 obreros en 4 días, limpiándose 0.24ha aproximadamente a razón de 10 t/ha, las cuales quedarían listas para fomentar áreas de cultivos.

Haciendo uso de este ejemplo presentado por Ramírez 2011, se tiene que tener en cuenta que utilizando la gasificación controlada con un 87,6% de rendimiento, se necesitarían 2719 kg de marabú para producir los mismos 3000 kWh, y a su vez se obtendrían 337 kg de carbón activado, subproducto que puede ser utilizado como adsorbente en diferentes procesos industriales. Además de que sería cortado por los mismos 4 obreros, pero en 4.5 días y quedarían 0.27 ha disponibles para sembrar.

Se encuentra también que, (Kumar, 2009), obtiene un 29% de rendimiento de carbón activado mediante tratamiento físico partiendo de cáscara del fruto de la *Jatropha curcas* L.

Por lo que se concluye que el porcentaje de rendimiento varía con el método de obtención y con el tipo de biomasa utilizada en el proceso.

Los porcentajes de rendimiento de cada método utilizado en el caso en estudio se muestran en la figura 3.1.

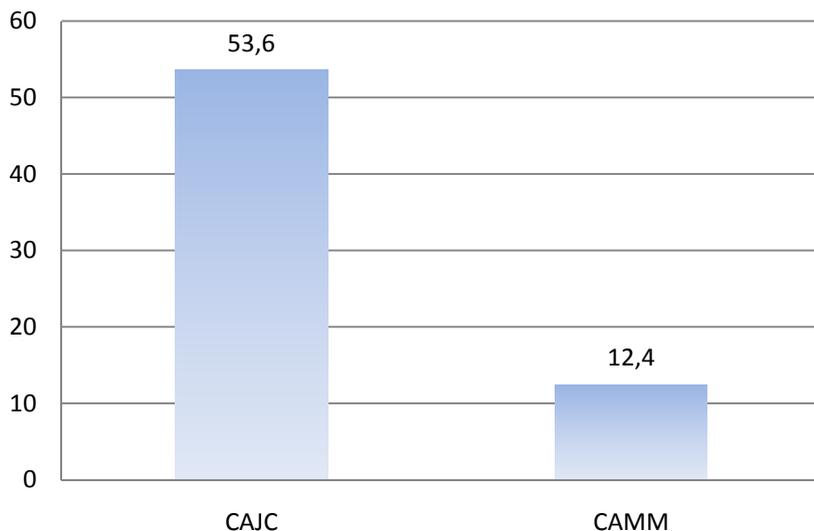


Figura 3.1 Porcentaje de rendimiento de los métodos de obtención del CAJC y CAMM.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS CARBONES ACTIVADOS: CAJC Y CAMM.

En esta etapa se discuten los resultados del porcentaje de humedad, contenido de cenizas, densidad aparente, índice de azul de metileno y porcentaje de adsorción que tiene cada carbón activado en estudio.

Humedad, cenizas y densidad aparente.

La humedad del CAJC y del CAMM es de un 7.53% y 5.9%, respectivamente (tabla 3.1 anexo 5), ambos se encuentran en los límites establecidos, ya que se permite hasta un 10% de humedad según Hernández, 2000.

Con respecto al contenido de cenizas, el CAJC tiene un 10,4% y el CAMM 6,8% (tabla 3.2 anexo 6). Según lo planteado en la bibliografía de Hernández, 2000, el porcentaje en cenizas permitido es de un 3%, comparado con este, los valores obtenidos son mucho mayores; pero por otra parte son inferiores a los encontrados en estudios realizados por Kumar, 2009 donde aparecen resultados hasta de un 12,5%. Por lo planteado anteriormente, la diferencia de valores es atribuible a que la composición en minerales de la muestras está influenciado por el método de obtención y la biomasa utilizada.

Los resultados obtenidos en la determinación de la densidad aparente se muestran en la tabla 3.3 y 3.4 de los anexos 7 y 8, respectivamente. El valor de 368 g/L correspondiente al CAJC, es cercano al 330 g/L reportado por Kumar, 2009 en sus estudios de obtención de carbón activado hecho con la cáscara de *Jatropha curcas* y el mismo método aquí tratado.

El CAMM tiene una densidad aparente igual a 195 g/L, la cual no posee referencia bibliográfica para ser comparada. Siendo mucho menor que la del Rox-08 y CAJC. El bajo valor de densidad aparente del CAMM nos indica un alto valor de porosidad coincidiendo con los estudios realizados por Rodríguez, 2004 quien plantea que un elevado grado de activación conduce a un descenso de la densidad y la resistencia mecánica del carbón.

En el capítulo 1 se explica que la densidad aparente en el diseño de equipos de filtración debe considerarse a la hora de llenar volúmenes fijos porque tiene implicaciones económicas. En el caso en estudio, las densidades de ambos carbones CAJC y CAMM son inferiores a la densidad aparente del carbón activado Norit Rox-08, que tiene un valor de 390 g/L.

En el epígrafe 3.6 referente al análisis económico se analiza la influencia de esta propiedad sobre los costos.

Índice de Azul de metileno.

El azul de metileno es un parámetro de calidad de los carbones en estudio, (Wimonrat, 2011) que permite medir el grado de activación y el poder de adsorción de estos.

La curva patrón que nos posibilita el cálculo de la concentración en equilibrio del azul de metileno en las muestras analizadas (tabla 3.5, anexo 9) es:

$$CONC. = \frac{Abs.}{0.148} \quad (R^2 = 0.995) \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde: *CONC.* – Concentración del azul de metileno y *Abs.* – Absorbancia

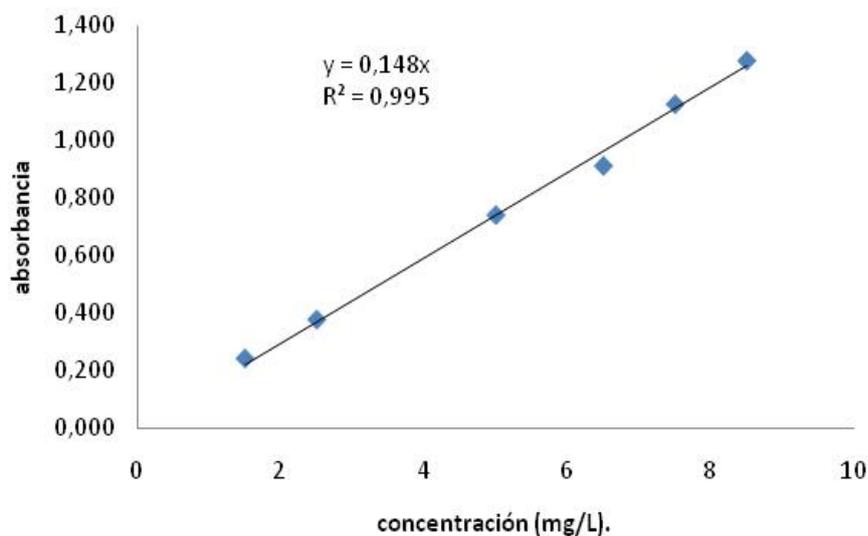


Figura 3.2. Curva patrón del azul de metileno.

Partiendo de una disolución de concentración exacta de azul de metileno igual a 5,03 mg/L, se muestra las lecturas realizadas en el espectrofotómetro cada 20 minutos y la concentración en equilibrio de cada carbón activado en estudio (tablas 3.6, 3.7 y 3.8, anexos 10, 11 y 12).

Los carbones activados CAJC y CAMM tienen un índice de azul de metileno igual a 0.2514 y 0.2399 respectivamente. Mientras que el carbón activado Norit Rox-08 posee un valor de 0.2402 apreciándose que no hay marcada diferencias entre uno u otro. Este resultado permite estimar que el área superficial de los carbones activados: CAJC y CAMM, tiene valores similares al utilizado en la entidad.

Con los resultados obtenidos se demuestra que en la superficie de los carbones CAJC y CAMM hay formación de microporos que garantizan la adsorción. Los carbones CAJC y CAMM tienen un alto grado de activación y poder de adsorción elevado, por lo que se prevé un área superficial alta, debido a la relación de proporcionalidad existente entre estas características.

Lo antes analizado coincide con (Rodríguez, 2004) quien plantea que los microporos ($r < 2$ nm) son los encargados de que se realice la adsorción y cuando el grado de activación es bajo la microporosidad es tan estrecha que la superficie no está totalmente disponible para la

retención del azul de metileno por tener un tamaño molecular mayor que el de una fracción de los microporos. Esto no ocurre a medios-altos grados de activación, pues los microporos se han ensanchado. La ausencia de microporos de mayor tamaño y de mesoporos hace que las cantidades retenidas de azul de metileno (con dimensiones moleculares de al menos 0.84 nm) sean prácticamente despreciables hasta que no se alcanza como mínimo el 30% de activación del carbón.

Como se puede observar en la figura 3.3 los resultados del porcentaje de adsorción de azul de metileno por los carbones: CAJC y CAMM; son muy cercanos al del carbón Rox-08. Incluso el CAJC tiene un porcentaje de adsorción mayor que el Norit Rox-08.

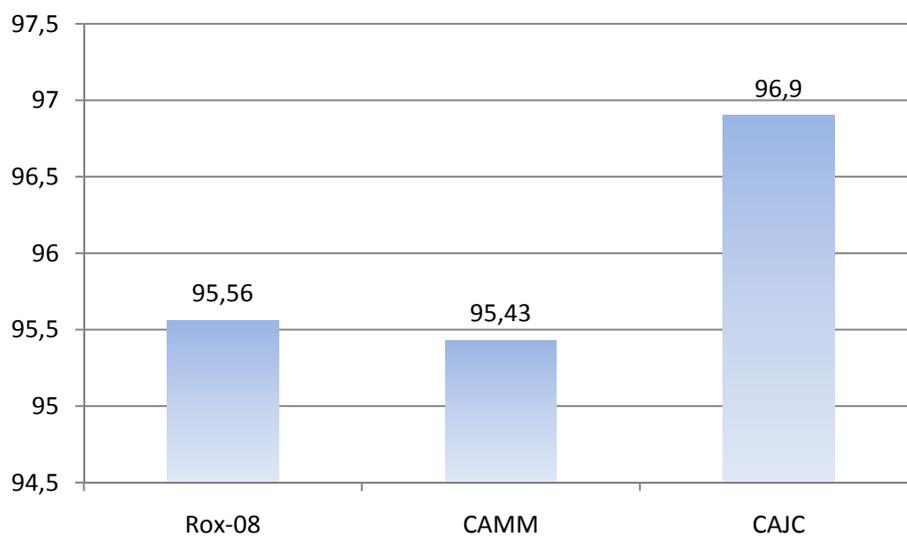


Figura 3.3 Porcentaje de adsorción del azul de metileno por los carbones activados: Rox-08, CAJC y CAMM.

(Kurniawan, 2011) plantea que, el tratamiento químico con agentes oxidantes tales como: ácido nítrico, peróxido de hidrógeno, nitrato de hierro III y tiosulfato de amonio podría incrementar la cantidad de grupos acídicos superficiales, principalmente ácidos carboxílicos y anhídridos, lactonas y grupos fenólicos en menor cuantía. Los grupos acídicos, especialmente los carboxílicos se enlazan a sitios básicos de los colorantes, especialmente del azul de metileno, de aquí que la presencia de estos grupos podría aumentar la capacidad de adsorción de los carbones activados.

Se justifica, por lo antes expuesto, el alto porcentaje de adsorción de azul de metileno del carbón activado fabricado en este trabajo, vía reacción con un oxidante fuerte, sobre la cáscara de Jatropha.

Se resume en la tabla 3.9 la caracterización de los carbones activados Norit Rox-08, CAJC y CAMM.

Tabla 3.9 Caracterización de los carbones activados Rox-08, CAMM, CAJC.

Características.	Carbón activado Norit Rox-08	Carbón activado CAJC.	Carbón activado CAMM.
Densidad aparente.(g/L)	390	369	195
% humedad	6	7	6
% Cenizas	3	10	7
% de adsorción	95.6	97.3	95.4
Índice de azul de metileno. (g AM*/g CA**)	0.24	0.25	0.24

*AM: azul de metileno, **CA: carbón activado.

3.3 Diseño y confección de los filtros empacados con los carbones activados: CAJC, CAMM y Norit Rox-08.

En este epígrafe se determina técnicamente, cuál de los carbones activados en estudio puede ser utilizado en el proceso de filtración del aguardiente, materia prima principal del proceso de fabricación de rones.

3.3.1 Determinación de la altura mínima de carbón activado, para alcanzar la acidez normada, (haciendo uso del primer modelo).

La acidez total para el aguardiente fresco según la norma cubana NC 291- 2009 no debe

exceder de 3,00 gramos de ácido acético por 100 L de aguardiente fresco. Se muestran en la tabla 3.10 del anexo 12, los resultados de acidez total del aguardiente filtrado a diferentes alturas de empaque de carbón, haciendo uso de las seis mini-columnas de vidrio confeccionadas. A continuación se presenta un resumen de la tabla 3.10.

Tabla 3.11 Resumen de la tabla 3.10, anexo 13.

Carbones en estudio.	Altura en (cm).	Acidez total (g/100mL de muestra).
Norit Rox-08	20	3
CAJC	2	15
CAMM	11	3

Los resultados son diferentes para cada carbón en estudio debido a que son hechos a partir de biomásas y métodos diferentes. Se observa que para el caso del CAMM y el Rox-08 a medida que se aumenta la altura de la cama de carbón; disminuye la acidez. Donde a una altura de 20 cm, la columna rellena con carbón Rox-08 alcanza la acidez deseada, mientras que con la del CAMM se requiere solamente de 11cm. No comportándose así el CAJC, el cual al aumentar la altura aumenta la acidez y junto a esto aparece un color amarillo en el aguardiente, evidenciándose una reacción con los grupos funcionales en la superficie del carbón.

Los resultados corroboran lo expuesto por Menéndez, 2006, la química superficial de un carbón activado tiene naturaleza anfótera; esto significa que en la superficie del carbón coexisten grupos superficiales de carácter ácido y grupos superficiales de carácter básico (Figura 3.4 anexo 14). El que un carbón sea globalmente ácido o básico dependerá tanto de la concentración de estos grupos como de la fuerza como ácido o base de los mismos, por lo que se puede deducir que un carbón de tipo básico será preferible para la adsorción de compuestos ácidos, antes que un carbón de tipo ácido y viceversa.

Con los resultados obtenidos se invalida técnicamente el CAJC para el proceso de filtración de aguardiente. Este afecta a parámetros físico-químicos que son importantes en

la evaluación de calidad del producto: la coloración (amarillo fuerte) y la acidez total (15 g/100 L de muestra del aguardiente). Coincidiendo con (Rodríguez, 2004) el grado de activación y poder de adsorción en los carbones activados es una medida necesaria pero no definitiva para decidir sobre el uso o no de un carbón activado en la filtración de determinada sustancia, ya que la química superficial de los carbones influye directamente sobre el adsorbato.

En el caso del aguardiente filtrado con CAMM, tiene una coloración cristalina y brillante, siendo este el color esperado. La acidez total expresada en gramos del ácido mayoritario por 100 L de muestra de aguardiente según NC no debe ser mayor que 3 y este valor se alcanza con una altura mínima de CAMM igual a 11cm. La cual representa el 55% de la altura utilizada con el Rox-08 para obtener los mismos resultados. Por el análisis realizado se concluye que el CAMM es el más adecuado para utilizar en el segundo modelo.

3.3.2 Diseño y confección de un filtro empacado con el carbón seleccionado (segundo modelo).

A partir de los resultados anteriores se toma el CAMM para empacar el filtro diseñado y confeccionado, según el criterio de similitud geométrica.

Conociéndose el diámetro del prototipo industrial y del tubo de acero inoxidable disponible para realizar el modelo se obtienen los siguientes resultados.

Dimensiones (m)	Prototipo (Industria).	Factor escala.	Modelo para el Rox-08.	Modelo para el CAMM.
Diámetro del filtro.	0.7	2.8	0.25	0.25
altura total	2.3		0.8	0.8
altura de la cama de carbón	1.6		0.57	0.31
Altura del soporte	0.2		0.07	0.07

Partiendo de la igualdad entre los regímenes de flujo del modelo y el prototipo, la relación entre sus velocidades de flujo a través de la cama debe ser igual al factor de escala:

$$Re = Re'$$

$$\frac{v * \rho * D}{\mu} = \frac{v' * \rho * D'}{\mu}$$

$$v * D = v' * D'$$

$$\frac{v}{v'} = \frac{D}{D'}$$

$$\frac{v}{v'} = \frac{D}{D'} = 2,8$$

3.4 Determinación de los parámetros de calidad del aguardiente filtrado con CAMM.

En este punto se exponen los resultados del grado alcohólico, la acidez total y las pruebas sensoriales del aguardiente filtrado con CAMM a escala piloto. Estos parámetros son utilizados para evaluar la calidad del aguardiente añejo a utilizar en el proceso de fabricación de ron.

3.4.1 Medición del grado alcohólico.

El grado alcohólico es un parámetro que se mantiene sin variaciones durante la etapa de filtración. Es decir, tanto en la entrada del filtro como en la salida, el grado alcohólico en el aguardiente debe ser el mismo.

Se logra con solo un pase de aguardiente añejo por la columna eliminar las diferencias del grado alcohólico, manteniéndose igual a 55GL tanto en la entrada como en la salida del filtro.

Consideramos como único inconveniente que el agua desmineralizada consumida para lavar el CAMM es mayor que la utilizada para el lavado del Rox-08. Esto se debe a que el CAMM es triturado manualmente y la etapa final de elaboración del carbón, que es el acondicionamiento del mismo, no se lleva a cabo con los requisitos establecidos en las literaturas consultadas, sino con los medios y equipos disponibles a nuestro alcance.

3.4.2 Determinación de la acidez total en el aguardiente añejo filtrado con el CAMM.

La acidez total del aguardiente fresco puesto en barriles para añejar, varía en dependencia del tiempo de añejamiento. Según consultas realizadas a Miguel Gil González ingeniero químico que ocupa el cargo de jefe del laboratorio de la entidad donde se realiza el presente trabajo, con más de 20 años de experiencia y que forma parte del panel sensorial, no existe un valor exacto normado de este parámetro; pero si se plantea, que la acidez aumenta con el tiempo de añejamiento, debido al papel que juegan los barriles en la fermentación del mismo. Por lo tanto el aguardiente fresco recepcionado tendrá una acidez total menor que el aguardiente añejo. Además en la filtración del aguardiente añejo la acidez total a la entrada es

mucho mayor que en la salida. El rango de acidez total para el aguardiente añejo a la salida del filtro es de 3 – 9 gramos de ácido acético por 100 L de muestra.

Haciendo uso de la metodología expuesta en el capítulo 2, se determina la acidez total del aguardiente añejo de seis meses, filtrado en la columna empacada con CAMM, donde los resultados obtenidos se comparan con un patrón, el cual no es otro que la filtración con Norit Rox-08. La tabla 3.13 muestra los resultados.

Tabla 3.13 Acidez total del aguardiente añejo de seis meses filtrado por los carbones activados: Norit Rox-08 y CAMM.

Acidez total en g de ácido acético/ 100ml de muestra.	Filtración de aguardiente con Norit Rox-08.	de Filtración de aguardiente con CAMM.
A la entrada del filtro.	8,9	8,9
A la salida del filtro.	3,6	3,4
Diferencia entre la entrada y la salida del filtro.	5,3	5,5

No existen diferencias de acidez entre el aguardiente añejo filtrado con CAMM y el Norit Rox-08, además de que se encuentra el resultado entre los parámetros establecidos. Por lo que con respecto a este parámetro el CAMM puede ser utilizado en la filtración de aguardiente.

3.4.3 Evaluación Sensoriales del aguardiente añejo filtrado con CAMM.

Este análisis es de gran importancia para garantizar la calidad del producto final (rones); debido a que el aguardiente empleado en el proceso de fabricación del ron, ocupa la mayor proporción y es el encargado de marcar el bouquet en el mismo. Aportando una textura, sabor y olor característico al ron cubano.

Con la evaluación sensorial realizada por un panel de 5 personas calificadas y aprobadas por la corporación, se concluye como calificación final cualitativa:

aceptable y cuantitativa con un total de 15,5 puntos de 20 que es el máximo a obtener (tabla 3.14, anexo 15). El inconveniente percibido por todos los panelistas fue el desbalance en el olor y sabor a madera quemada. Esto se debe a que el CAMM fue tratado con vapor de agua a 151 °C con el objetivo de eliminar este problema, pero el equipo disponible y las condiciones existentes en esta etapa de acondicionamiento del carbón no fueron las adecuadas según la literatura consultada de Rivera, 2009 referidas a utilizar vapor de agua entre 300 – 500 °C.

Se anexa al trabajo las fichas originales que muestran los resultados certificados por el panel sensorial.

3.5 Análisis económico.

Por razones de tiempo no se cuenta con los datos necesarios para realizar un estudio económico profundo pero con un simple análisis basado en la hipótesis de que el costo del CAMM fuese el mismo del Norit Rox-08, carbón que tiene un reconocido prestigio internacional, se muestra que es una solución para el problema existente.

Al ser la densidad aparente del CAMM menor que la del Rox-08, su peso en masa a la hora de ocupar un mismo volumen es menor. Es decir suponiendo la misma altura de cama en el filtro para ambos carbones, se tendría un mismo volumen a ocupar pero pesos diferentes a la hora de comprar. Por otra parte se demuestra en el segundo modelo que para una altura de CAMM igual a 0.31 m se logra cumplir con los parámetros de calidad del

aguardiente filtrado. Representando el 55% de la altura a utilizar con el Rox-08. Ahora bien, haciendo uso de la hipótesis de que ambos carbones tengan el mismo precio de 7,32 \$/kg y el mismo tiempo de vida útil, para empacar un filtro se obtienen los resultados mostrados en la tabla 3.14.

Tabla 3.14 Comparación económica de los carbones activados: Norit Rox-08 y CAMM.

Empaque de:	Altura de la cama. (m)	Volumen. (m ³)	Densidad. (kg/m ³)	Masa. (Kg)	Gastos por consumo. (\$).
CAMM	0.88	0.385	195	75	549.05
Rox-08	1.6	0.615	390	240	1756.80

Los resultados muestran que la densidad aparente y la altura de la cama de carbón influyen directamente sobre los costos, siendo favorables los valores reportados para el CAMM. Se observa que los gastos por consumo del Norit Rox-08 son 3,2 veces más que el CAMM, resultado tentativo, que invita a realizar un estudio profundo de la propuesta planteada en el presente trabajo.

Conclusiones

- 1- Mediante la gasificación controlada y el tratamiento químico con ácido sulfúrico (98 %), se obtiene carbón activado de la madera de marabú y de la cáscara de la *Jatropha curca* L., respectivamente, con un poder de adsorción mayor de un 95 %.
- 2- El carbón activado obtenido mediante el método químico con ácido sulfúrico de la cáscara de la *Jatropha curca* L. (CAJC), no debe ser utilizado en la filtración de aguardiente, ya que altera los parámetros físico-químico del mismo y a su vez la calidad del producto final.
- 3- El carbón activado hecho de la madera de marabú (CAMM) obtenido mediante gasificación controlada puede ser utilizado como adsorbente en la etapa de filtración de aguardiente.
- 4- Técnicamente es posible sustituir el carbón Norit Rox-08 por el CAMM y producirlo nacionalmente lo cual da respuesta a la hipótesis del presente trabajo.

Recomendaciones

- 1- Profundizar en el estudio técnico- económico de los métodos de obtención de los carbones activados: CAJC y CAMM.
- 2- Realizar un estudio de adsorción del CAJC, utilizando otro método de obtención y otro adsorbato.

Bibliografías.

1. Aguilar, Orlando. (2006). La biomasa como una fuente de energía renovable en Centroamérica. *Profesor FIM / UTP Consultor en Mediciones Ambientales y Fuentes Renovables de Energía*.
2. Ballesteros, Mercedes (2001). "Curso de formación del profesorado en el área de energías renovables - Biomasa", CIEMAT.
3. Bansal, R.C.; Donnet, J.B. y Stoeckli, F. (1998). *Activated Carbon*. Marcel Dekker, New York.
4. Becker, Makkar K (1999). *Jatropha y Moringa Magdeburg*. [Consulta: 11/2/2012]. Disponible en: <http://ieonline.bioenergia.html>.
5. Beenackers, A.A.C.M. y Bridgwater, A.V, (1989). "Gasificación y pirolisis de la biomasa en [Europa](#)". *Pyrolysis and Gasification*. [Conferencia](#) Internacional, Luxemburgo, pp. 129.
6. Berris, L. (2007). Perspectivas de los aceites de oleaginosas no comestibles en Cuba. Intervención en el Segundo Taller Nacional de Cultivo de Plantas Oleaginosas y Producción de Biocombustibles, Bartolomé Massó, Abril 15.
7. Brizuela, Enrique. (1987). Aspectos Fundamentales del Diseño de Plantas Industriales. Editorial ISPJAE. Ciudad de la Habana. Tomo I y II.
8. Carpintero, Oscar (2006). Biocombustibles y usos energéticos de la biomasa: un análisis crítico. *El ecologista* (49). [Consulta: 20/3/2012]. Disponible en: <http://habitat.aq.upm.es/bioc/aocar.html>.
9. Caturla, F., A., Martín-Martínez, J.M., Molina-Sabio, M., Rodríguez-Reinoso, F. y Torregrosa, J. (1988). *Colloid Interface Sci.* 528.
10. Cordero, T., (1987). [Tesis](#) en opción al grado de Doctor en Química, [Universidad](#) de Málaga, [España](#), p. 95-98.
11. Cordero, T., García Herruzo, F. y Lahoz Gómez, C., (1989). "Estudio de la pirolisis convencional de madera de Encina (*Quercus rotundifolia*) y pino (*Pinus halepensis*), *An. Quim.*, 85, No 3, p. 445-447.
12. Cordoví Hernández, Eduardo (1988). *Bebidas Notables*. Ediciones Oriente. Santiago de Cuba.

13. Delgado, Carlos. (1979). El libro de los aguardientes y licores. Ediciones, Madrid. España. pp235.
14. Dougall, Mc J.S., (1991). "Metall", Afr. Inst. Min. 91, 4, p. 109-120.
15. Estevan, Antonio (2008). Biocombustibles: la agricultura al servicio del automóvil. El ecologista (56). ISSN 1575-2712. [Consulta: 11/2/2012]. Disponible en: <http://habitat.aq.upm.es/bioc/aaest.html>.
16. Fabregat, Pedro y Reyes, Enrique (2001). Cantinero a la medida. Ediciones Balcón. La Habana. Cuba. pp 59.
17. Falconi, Ezio (1997). *Distillati e Licori*. Milano. Italia.
18. Foidi, N.; Eder P. (1997). *Agro - Industrial Explotation of J, curcas*. Evento Internacional de Jatropha. Managua. Nicaragua.
19. Galo Pavón, Garcés (2009). Estudio de las Características Botánicas y Etnobotánicas de *Jatropha curcas* L. [Consulta: 21/2/2012]. Disponible en: <http://habitat.aq.upm.es/bioc/aocar.html>.
20. Garrido, J. y Linares, Solano A. (1997). *Characterization of their physico-chemical properties. Chemical engineering research and design* 8 9 335–340.
21. Glasstone, Samuel (1968). Tratado de Química Física. Edición Aguilar, Madrid pp 629.
22. González-Tovar, L. A. (2005). "Cinética de adsorción de pigmentos, peróxidos y tocoferoles durante el proceso de blanqueo del aceite de soja". *Grasas y Aceites*. Vol. 56. Fasc. 4, 324-327.
23. Granger Brown, George. (1967). Operaciones Básicas de la Ingeniería Química. Ediciones Revolucionaria. La Habana. pp 629.
24. Grasi, G., (1989). "Pyrolysis and gasification of biomass". *Pyrolysis and Gasification*. Conferencia Internacional, Luxemburgo, p. 7.
25. Hastouglum M.A. y Hassam, M.S., (1995). "Aplication of a genral gas-solid reaction model to flash pyrolysis of wood in a circulating fluidized bed". *Fuel*, vol. 74, No 5, p. 697.
26. Hernández López, Ena de los Ángeles. (2000). La regeneración del carbón activado en polvo como una vía de solución a la afectación ambiental que provoca su vertimiento. Tesis presentada en opción al grado académico de máster en control y tratamiento de la contaminación ambiental. Universidad de Matanzas.

27. Hüttinger, K.J. y Fritz, Oliver W., (1991). "The carbon-carbon dioxide reaction: an extended treatment of the active-site concept", *Carbon*, vol.29, No.8, p.1113.
28. Kasatkin, A. G., (1987). *Operaciones Básicas y Aparatos en la Tecnología Química*. Tomo II. Editorial Pueblo y Educación. Playa Ciudad de la Habana. pp 485.
29. Kocaefe, D., Charrete, A. y Castonguay, L., (1995). "Green coke pyrolysis: investigation of simultaneous changes in gas and solid phases", vol.74, No.6, P.791-793.
30. Koranyi, A. (1989). "The relationship between specific reactivity and the pore structure of coal chars during gasification", *Carbon*, vol. 27. No 1, p. 55.
31. Kumar, Ramakrishnan; Chinnaiya, Namasivayam (2009). *Development and Characteristics of activated Carbons from Jatropha Husk, Anagro Industrial Solid Waste, By Chemical Activation Methods*. *J. Environ. Eng. Manage.* 19(3), 173-178.
32. Kurniawan, Alfin; Ismadji, Suryadi. (2011). "Potential utilization of Jatropha curcas L. press-cake residue as new precursor for activated carbon preparation: application in methylene blue removal from aqueous solution". Elsevier 42-826-836.
33. Lei, Song; Miyamoto, Jun-ichi.(2006). "Enhancement of the methylene blue adsorption rate for ultramicroporous carbon fiber by addition of mesopores", *Science Direct. Carbon* 44, 1884-1890.
34. Marsh, H. y Kuo, K., (1989)."Kinetics and catalysis of carbon gasification", in *Introductio to Carbon Science*, capit.4, p.128-131.
35. Martín, C.; Moure A.; Martín G.; Carrillo E.; Domínguez H. y Parajó, JC (2008). *Fractional characterisation of some non-edible oil-bearing seeds to be used for biodiesel production in Cuba. Biomass Bioenergy*.
36. Martín, Marcos. (2005). *Planta de generación de electricidad con gasificación de biomasa. Proyecto EQTEC Iberia / Energía natural de Mora*. [Consulta: 7/3/2012]. Disponible en: http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2005/12/25/148058.p hp.
37. Martins, Alejandra (2012). Ingenieros escoceses buscan la solución para una pesadilla cubana. *BBC Mundo* (martes, 24 de enero del 2012). [Consulta: 22/3/2012]. Disponible en: Available online at www.sciencedirect.com.
38. Mattson, J.B. y Mark, H.B. (1971). *Activated Carbon*. Marcel Dekker, New York.

39. Meijer, R., Kapteijn, F. y Moulijn, A.J., (1994). "Kinetics of the alkali-carbonate catalysed gasification of carbon: 3.H₂O gasification", *Fuel*, vol.73, No 5, p.723-729.
40. Menéndez Díaz, J. Ángel y Gullón, Martín I. (2008). *Activated Carbon Surfaces in Environmental Remediation*. [Consulta:22/3/2012] Disponible en: <http://ieonline.microsoft.com/#ieslice> .
41. Míguez Tabares, José Luis. (2012). Procesos termoquímicos para obtención de energía a partir de la fitomasa residual (Combustión, Gasificación, Pirólisis) p 233, cap.9. [Consulta:22/3/2012] Disponible en: <http://habitat.ag.upm.es/bioc/aaest.html>.
42. Molina Sabio, M.; Pérez, V. (1999). *Carbon* 32, 1259. [Consulta:22/3/2012] Disponible en: <http://www./carbon/activo/impqcatex.html>.
43. Montes de Oca López, Sofía; Sotolongo Pérez, José Ángel. (2005). Monografía *Jatropha Curcas*. Una especie importante para el medio ambiente. Sus potencialidades económicas y producción de biodiesel. Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. Centro de Aplicaciones Tecnológicas para el Desarrollo Sostenible. CATEDE.
44. Montes de Oca López, Lic. Sofía; Sotolongo Pérez, Ms.C José Ángel (2007). La *Jatropha curcas* L. una opción para el desarrollo sostenible. Conferencia de cultivo de la JCL en Granma el 13-4-2007.
45. Muñoz Ramos, Juan (1996). Enciclopedia de los Alcoholes. Editorial Planeta, Barcelona.
46. Naredo, José Manuel. (2009). Fuentes de biomasa para fines energéticos. [Consulta: 2012/3/10]. Disponible en: <http://ieonline.microsoft.com/#ieslice>.
47. Om Tapanes, Neyda C; Gomes Aranda, Donato A.; Mesquita Carneiro, José W; Ceva Antunes, Octavio A. (2008). *Transesterification of Jatropha curcas oil glycerides: Theoretical and experimental studies of biodiesel reaction Fuel 87 (2008) 2286–2295*. [Consulta: 10/3/2012]. Disponible en: [Available online at www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).
48. Openshaw, Keith (2000). *A review of Jatropha Curcas: an oil plant unfulfilled promise. Biomass and Bioenergy, 19*.
49. Oviedo, J. (2012). [Properties](#) of activated carbon.CPL Carbon Link./2012/2/27 [Consulta: 22/3/2012] Disponible en: <http://ieonline.microsoft.com>.
50. Rapado Moreno, Jorge. (2011). "Fraccionamiento de las cáscaras de *Jatropha Curcas* L. mediante pretratamiento ácido diluido e hidrólisis enzimática para la producción de etanol celulósico." Tesis presentada en opción a Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas.

51. Revuelta Pereiro, Jesús. (2004). *Biomasa y Gasificación*. [Consulta: 7/3/2012]. Disponible en: <http://ieonline.cujae.edu.cu>. 2012/2.
52. Rivera Ortiz, Arturo; Ramírez Zamora, Rosa María y Durán Moreno, Alfonso (2009). Pruebas RSSCT con mini-columnas de carbón activado para remover materia orgánica natural (MON) presente en aguas naturales. Instituto de Ingeniería, UNAM, Apdo. Postal 70-472 Coyoacán, 04510 México, D.F. [Consulta: 7/3/2012]. Disponible en: rmrz@pumas.iingen.unam.mx.
53. Rodríguez Reinoso, F. y Linares-Solano, A., (1989). "Microporous Structure of Activated Carbon as Revealed by Adsorption Methods", in *Chemistry and Physics of Carbon*, vol. 21, p. 36-56,
54. Rodríguez Reinoso, F., (1991). "Controlled, gasification of carbon and pore structure development", in *Fundamental Issues in Control of Carbon Gasification Reactivity*", Series E., *Applied Sciences*, vol. 192, p. 536, Shafyazadeh, F., *Adv Chem. Ser.*, 207, 489.
55. Rodríguez Reinoso, F.; Molina Sabio, M. (2004). El carbón activado en procesos de descontaminación. Universidad de Alicante. España. [Consulta: 7/3/2012]. Disponible en: <http://ieonline.cujae.edu.cu>. 2012/2.
56. Rodríguez Reinoso, F.; Molina-Sabio, M. y Muñecas, M.A. (1992). *Phys Chem.* 96, 2707. [Consulta: 22/3/2012] Disponible en: <http://ieonline.microsoft.com>.
57. Rodríguez Reinoso; F. (2002). [Carbón](#) vegetal/carbón y ecología/2012/2/27 [Consulta: 22/3/2012] Disponible en: <http://ieonline.microsoft.com>.
58. Roig, Juan Tomás (1981). *Diccionario de nombres vulgares*. Editorial Pueblo y Educación. La Habana.
59. Rosabal Vega, Julio M. y Valles Matos, Manuel. (2006). *Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas*. Editorial Félix Varela. La Habana. tomo I y II pp 317.
60. Schmook B.; Peaza, L. Serralta. (1997). J. Curcas. Distribución y usos en la Península de Yucatán, México. Evento Internacional de *Jatropha Managua Nicaragua*. [Consulta: 2/3/2012] Disponible en: <http://ieonline.microsoft.com.www>. Jatropha curcas. Cultivo.

61. Sluiter, A., Hames, B., Hyman, D., Payne, C., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., Wolfe, J. (2003a) Determination of total solids in biomass and total dissolved solids in liquid process samples. Laboratory Analytical Procedure (LAP). Technical Report NREL/TP-510-42621. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado.
62. Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D. (2003b) Determination of ash in biomass. Laboratory Analytical Procedure (LAP). Technical Report NREL/TP-510-42622. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado.
63. Soltés, E.J. y Elder, T.J., (1981). "Pirólisis in Organic Chemicals from Biomass", Goldstein, I.S. (Eds), Cap. 5, CRC Press, Boca Raton. Fla.
64. Sotolongo Pérez, José Ángel; Ohm, Neyda (2007). Producción Sostenible de Biodiesel, usando la biomasa del árbol JCL cultivado en tierras semidesérticas y abandonadas por la producción agrícola. "Curso de formación". CATEDES. CITMA - CIEPET. MIMBAS.
65. Suárez, J.A. y Beatón PA., (2007). Estado y perspectivas de las energías renovables en Cuba. Tecnología Química 27, 3. 75-82.
66. Travieso Pedroso, Daniel y Cala Aiello, Ramón. (2003). Estudio experimental del proceso de secado de la *Dichrostachys Cinarea*, variante africana (Marabú); en lecho fijo y lecho fijo con flujo de aire caliente. *Grupo de Estudios de Procesos Térmicos de la Biomasa. Universidad de Camaguey, Circunvalación Norte km. 5.5, Camaguey, Cuba.* [Consulta:29/3/2012] Disponible en: travieso@em.reduc.edu.cu
67. Valero, Antonio. (2005). Biomasa. Una fuente de energía renovable limpia con grandes posibilidades de futuro. Medio Ambiente y Energía. [Consulta:22/3/2012] Disponible en: http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2005/12/25/148058.php
68. Van Heek, K.H. and Mühlen, H.J., (1991). "Chemical Kinetics of carbon and char gasification", in Fundamental Issues in Control of carbon. Gasification Reactivity, Series E: Applied Sciences, vol 192, p.2-9.
69. Wigmans, T., (1982)."Comparison of activated carbons produced by partial steam gasification of various carbonaceous materials", Activated carbon, a fascinating material, Norit N.V., p.58.

70. Wigmans, T., (1986). "Fundamentals and practical implication of activated carbon production by partial gasification of carbonaceous materials", in Carbon and Coal Gasification, Figueiredo, José L. y Moulijn J.A. (Eds), NATO Scientific Affairs Division, p.561.
71. Wigmans, T., (1989). "Industrial aspects of production and use of activated carbons", Carbon, vol.27, No.1, p.13-15.
72. Wimonrat Tongpoothorn, Manop Sriuttha; Phunsiri Homchan, Saksit Chanthai; Chalerm Ruangviriyachai (2011). *Preparation of activated carbon derived from Jatropha curcas fruit shell by simple thermo-chemical activation. Elsevier 89- 335-340* [Consulta: 29/3/2012] Disponible en: www.elsevier.com/locate/cher.
73. Zanzi, R., Sjostrom, K. and Björnbom, E., (1996). "Rapid high temperature pyrolysis of biomass in a free-fall reactor", Fuel, vol. 75, No 5, p. 547.

Anexo 2.

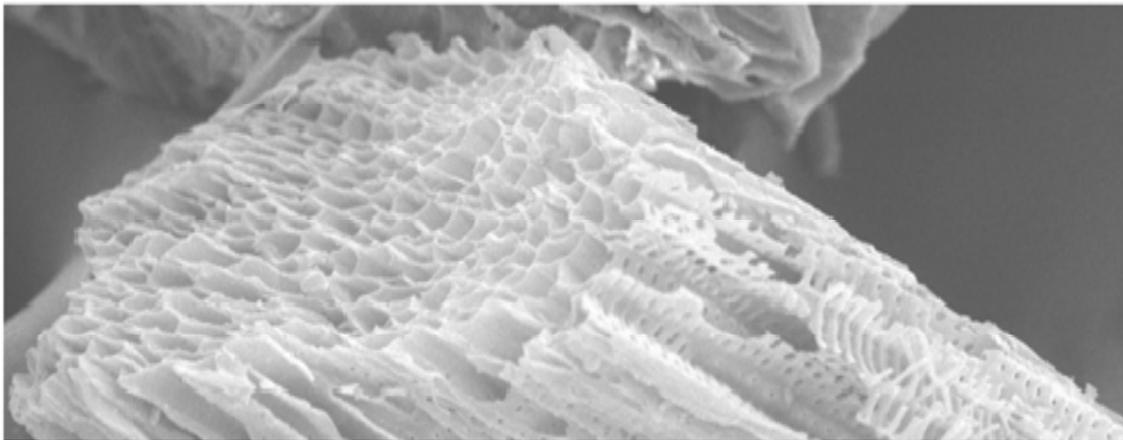
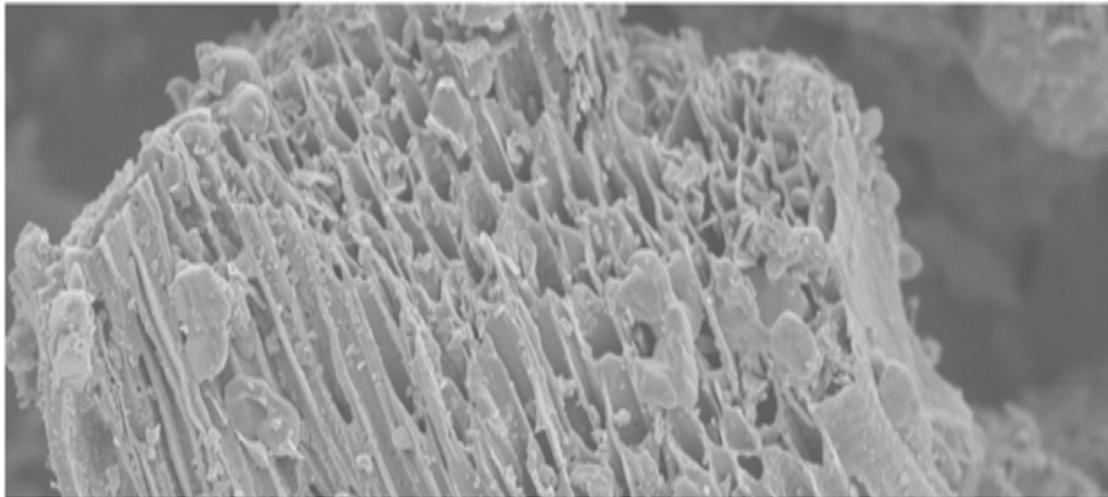


Figura 1.2 Fotos de la superficie de un carbón activado. (Kumar, 2009).

Anexo 3.

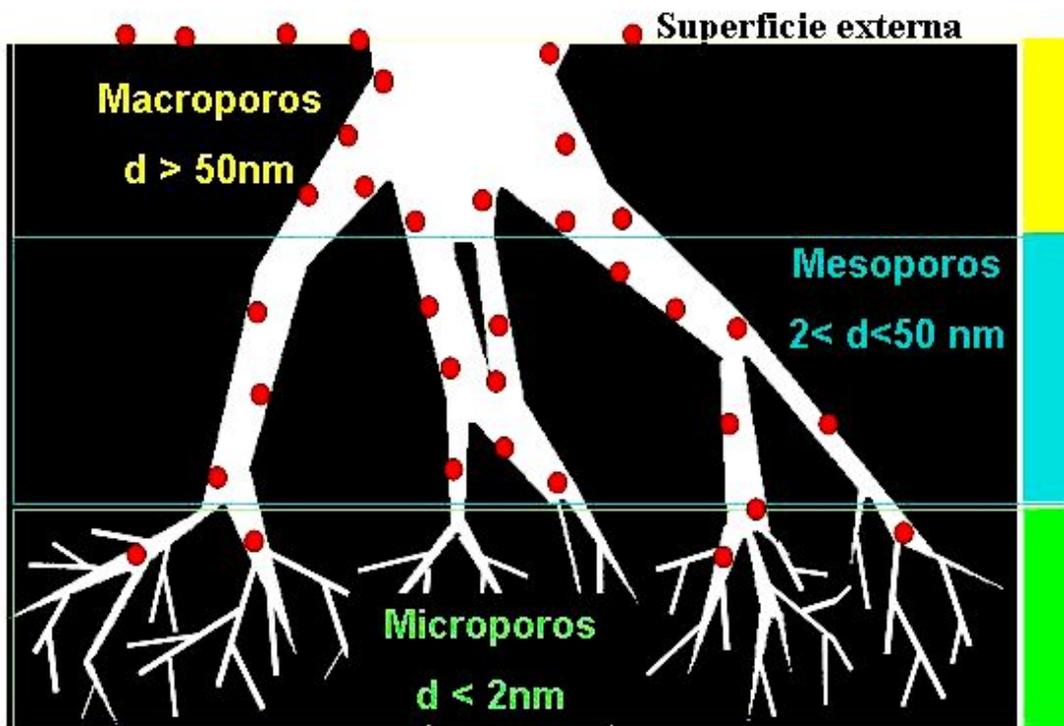


Figura 1.2 Representación de los radios porales.

Anexo 1.

carbón activo en forma de polvo



carbón activo granular

troceado



conformado



Fibras de carbón



Telas de carbón



monolitos hechos íntegramente de carbón



monolitos cubiertos de una capa de carbón



membrana de carbón sobre un tubo de acero



Figura 1.1 Diferentes formas de presentación de los carbones activados.

Anexo 4.

Tabla 2.1 Calificación de los atributos sobre la base de: los defectos, intensidad de percepción y grado de afectación.

CALIFICACION DE LOS ATRIBUTOS			
TIPO DE DEFECTO	INTENSIDAD DE PERCEPCION	GRADO DE AFECTACION	CALIFICACION
leve	Muy Ligero	Nada importante, presenta el valor sensorial diseñado.	5
	Ligero	Poco importante, poca afectación en su valor sensorial.	4
	Moderado	Mediana afectación en su valor sensorial.	3
	Marcado	Afectación severa	2
	Muy marcado	Altamente afectado	1
grave	Muy Ligero	Poco importante, poca afectación en su valor sensorial.	4
	Ligero	Mediana afectación en su valor sensorial.	3
	Moderado	Afectación severa	2
	Marcado	Altamente afectado	1
Crítico.		Afectación importante	No se continúa la evaluación de la muestra
	PERCEPTIBLE	Altamente rechazable	

(hace al producto no apto para los fines previstos)

Anexo 5.

Tabla 3.1. Valores de Humedad.

Descripción	Pesada-1 (g).	Pesada-2 (g).	Masa de H2O (g).	Humedad (%).	Humedad media (%).
CAJC-1	57,7311	57,677	0,0541	7,72	7,53
CAJC-2	56,9539	56,9018	0,0521	7,33	
CAJC-3	54,7414	54,6871	0,0543	7,53	
CAMM-1	52,5377	52,4939	0,0438	6,24	5,99
CAMM-2	57,9793	57,9433	0,036	5,01	
CAMM-3	59,7305	59,6829	0,0476	6,73	

Anexo 6

Tabla 3.2 Valores del % de Cenizas.

Descripción	Masa inicial (g).	Pesada-1 (g).	Pesada-2 (g).	Masa final (g).	Contenido de cenizas (%):	Media del Contenido de Cenizas (%).
CAJC-1	0,801	16,796	16,8881	0,0921	11,5	10,41
CAJC-2	0,7879	17,7507	17,8226	0,0719	9,12	
CAJC-3	0,7574	15,5119	15,5921	0,0802	10,6	
CAMM-1	0,7227	17,1173	17,0743	0,043	5,95	6,82
CAMM-2	0,7491	16,3291	16,2921	0,037	4,94	
CAMM-3	0,7356	19,6213	19,5509	0,0704	9,57	

Anexo 7.

Tabla 3.3. Mediciones de la densidad aparente del CAMM.

Muestras	Masa de carbón. (g)	Volumen. (L)	Densidad (g/L)	Densidad media. (g/L)
CAMM 1	5,71	0,03	190,33	195,63
CAMM 2	5,69	0,029	196,21	
CAMM 3	5,69	0,029	196,21	
CAMM 4	5,73	0,031	184,84	
CAMM 5	5,66	0,027	209,63	
CAMM 6	5,7	0,029	196,55	

Anexo 8.

Tabla 3.4. Mediciones de la densidad aparente del CAJC.

Muestras	Masa de carbón.(g)	Volumen. (L)	Densidad. (g/L)	Densidad media. (g/L)
CAJC 1	7,38	0,02	369	368,40
CAJC 2	7,4	0,0205	360,97	
CAJC 3	7,33	0,019	385,79	
CAJC 4	7,41	0,0205	361,46	
CAJC 5	7,4	0,0205	360,97	
CAJC 6	7,37	0,0198	372,22	

Anexo 9.

Tabla 3.5. Valores de absorbancia para diferentes concentraciones del azul de metileno.

Concentración de azul de metileno. (mg/L)	Muestra A-1	Muestra A-2	Muestra A-3	Absorbancia promedio.
1,5	0,246	0,246	0,245	0,25
2,5	0,38	0,382	0,381	0,38
5	0,744	0,743	0,746	0,74
6,5	0,916	0,915	0,915	0,92
7,5	1,128	1,132	1,129	1,13
8,5	1,281	1,282	1,279	1,28

Anexo 10.

Tabla 3.6 Valores de absorbancia del azul de metileno (5,0318 mg/L), en contacto con los carbones activados, a diferentes tiempo.

Tiempo (min)	Absorbancia del Rox-08.	Absorbancia del CAJC.	Absorbancia del CMM.
0	0,744	0,744	0,744
20	0,666	0,656	0,675
40	0,604	0,585	0,620
60	0,533	0,203	0,569
80	0,456	0,140	0,473
105	0,394	0,090	0,397
125	0,334	0,053	0,336
150	0,286	0,023	0,288
170	0,266	0,023	0,271
185	0,257	0,023	0,263
200	0,250		0,256
220	0,217		0,214
1400	0,033		0,034
1420	0,033		0,034
1440	0,033		0,034

Anexo 11.

Tabla 3.7 Concentración del azul de metileno en contacto con los carbones activados: Rox-08, CMM y CAJC, a diferentes intervalos de tiempo.

Concentraciones del azul de metileno. (mg/L)			
Tiempo (min).	Contacto con el Rox-08.	Contacto con el CMM.	Contacto con el CAJC.
0	5,03	5,03	5,03
20	4,51	4,57	4,44
40	4,09	4,19	3,96
60	3,61	3,85	1,37
80	3,08	3,20	0,95
105	2,67	2,69	0,61
125	2,26	2,27	0,36
150	1,93	1,95	0,16
170	1,80	1,83	0,16
185	1,74	1,78	0,16
200	1,69	1,73	
220	1,47	1,45	
1400	0,22	0,23	
1420	0,22	0,23	
1440	0,22	0,23	

Anexo 12.

Tabla 3.8 Comportamiento del índice de azul de metileno.

Tiempo (min).	Mg de azul de metileno adsorbido/g de carbón.		
	rox-08	CAMM	CAJC
0	0	0	0
20	0,53	0,46	0,59
40	0,94	0,84	1,07
60	1,43	1,18	3,66
80	1,95	1,83	4,09
105	2,37	2,35	4,42
125	2,77	2,76	4,67
150	3,10	3,08	4,88
170	3,23	3,20	4,88
185	3,29	3,25	4,88
200	3,34	3,30	
220	3,56	3,58	
1400	4,81	4,80	
1420	4,81	4,80	
1440	4,81	4,80	

Anexo 13.

Tabla 3.10 Determinación de la acidez total en el aguardiente filtrado a diferentes alturas de cama de carbón.

Carbones en estudio.	Alturas (cm)	Volumen 1 (ml)	Volumen 2 (ml)	Volumen cons. (ml)	Acidez total.	Acidez total media.
Rox-08	9	1,6	4,4	2,8	6,72	
		6,2	8,9	2,7	6,48	6,64
		10,5	13,3	2,8	6,72	
	15	15	17	2	4,8	
		18,3	20,3	2	4,8	4,8
		21,6	23,6	2	4,8	
	20	1,4	2,6	1,2	2,88	
		3,9	5,2	1,3	3,12	2,96
		6,6	7,8	1,2	2,88	
CAMM	9	10,1	11,8	1,7	4,08	
		13	14,6	1,6	3,84	4,08
		16,6	18,4	1,8	4,32	
	11	19	20,2	1,2	2,88	
		22,3	23,6	1,3	3,12	3,04
		1,1	2,4	1,3	3,12	
CAJC	9	4,3	10,8	6,5	15,60	
		10,6	17	6,4	15,40	15,44
		4,2	10,6	6,4	15,40	
	15	15	22,1	7,1	17,04	
		4,5	11,5	7,0	16,80	16,88
		15,7	22,7	7,0	16,80	
	4	3,2	9,3	6,1	14,64	
		12,1	18,4	6,3	15,12	14,8
18		24,1	6,1	14,64		

Anexo 14.

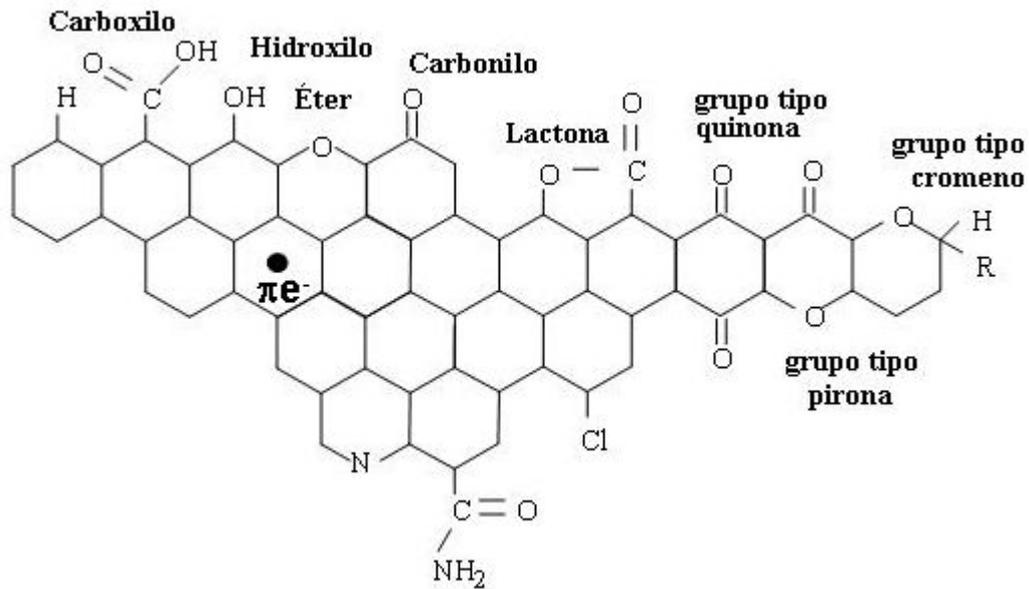


Figura 3.4 Representación esquemática de los principales grupos superficiales que pueden encontrarse un carbón. La mayoría de estos grupos son grupos oxigenados, debido a la tendencia de los carbonos a oxidarse incluso a temperatura ambiente. Los electrones deslocalizados de los orbitales π juegan un papel importante en la química superficial de los carbonos.

Anexo 15.

Tabla 3.11 Resultados de la evaluación sensorial.