

Procedimiento tecnológico para la obtención de carbón activado calidad USP 30 para uso médico farmacéutico

Carlos A. Rey-Mafull, Alberto Iglesias-Cerveto,* Raquel García-Gallardo y Rubén Aja-Muñiz.*****

Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales de la Universidad de la Habana, Ciudad de la Habana, Cuba. Correo electrónico: mafull@imre.oc.uh.cu. *Centro Nacional de Investigaciones Científicas, **Laboratorio Reinaldo Gutiérrez, ***Instituto de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica.

Recibido: 14 de abril de 2010.

Aceptado: 24 de agosto de 2010.

Palabras clave: carbón activado, lixiviación, adsorción, purificación, microporos.

Key words: activated carbon, leaching, adsorption, purification, micropores.

RESUMEN. Con el procedimiento tecnológico de purificación que se describe se logró obtener un carbón activado (M1) con características similares a los carbones activados de importación según las normas de las Farmacopeas 30 de los Estados Unidos y la Británica, así como las cubanas. Los resultados se compararon con dos referencias internacionales que actualmente importa el país (> 5 500 USD/t), Norit USP XX y RPCh. El primero de estos materiales ha sido usado en Cuba por más de 20 años en el Sistema Nacional de Salud Pública como antídoto en casos de intoxicación medicamentosa y como materia prima en la confección de tabletas de carbón y pepsina (para el tratamiento de desarreglos digestivos). Se tuvieron en cuenta además, otros aspectos comparativos como son: características físico químicas (absorción atómica y ACP-AES) y adsorción puntual [número de yodo, melaza (%), azul de metileno y estricnina]. Este procedimiento tecnológico consta principalmente de lixiviaciones ácido-base a temperatura ambiente, etapas de filtración con lavados muy simples y recirculación de licores durante el proceso. Los resultados correspondientes a los diferentes carbones fueron procesados estadísticamente mediante pruebas de múltiple rango, no se encontraron diferencias significativas ($\alpha = 0,05\%$) entre ellos. Esta valoración es indicativa de la efectividad del procedimiento de purificación propuesto. Un estudio de prefactibilidad económica arrojó resultados favorables en cuanto a los índices económicos considerados: VAN, TIR, EE, PRI, precio estimado y costo de producción. Todos los resultados en su conjunto avalan la posibilidad de contar en Cuba con un proceso y como resultado de él, con un material de suficiente calidad para la sustitución de importaciones a corto plazo.

ABSTRACT. A technological purification procedure for obtaining a Cuban activated carbon is described. Characteristics of the obtained charcoal are similar to those corresponding to imported materials according to the following standards: United States Pharmacopeia 30, British Pharmacopeia (BP) and the Cuban National Standards. Results obtained during purification of Cuban activated carbon (M1) were compared with two imported materials as reference: USPXX Norit and RPCh. The first of these materials have been used during more than 20 years in the Cuban National Health System in cases of medical poisoning and as raw material in the preparation of coal and pepsin tablets for digestive disorders. Besides, the following comparative aspects were considered: physical chemical characterization, atomic absorption and ACP-AES analysis and specific adsorption: iodine number, molasses percent, methylene blue and strychnine. Technological procedure consists mainly of an acid leaching-base without heating, including filtration stages and very simple washings waters, as also recirculation of liquors of the process. Comparison results were statistically processed by a multiple range test and differences obtained were not significant ($\alpha = 0,05\%$). It is an indication of the effectiveness of the purification procedure. Economic feasibility study offers favourable results in the indexes considered: NPV, IRR, EE, ROI, estimated price and production cost. All these results as a whole support the possibility of having in Cuba with a process and as a result of it, with a material of sufficient quality to replace imports in the short term.

INTRODUCCIÓN

Cuba cuenta desde 1997 con una planta industrial de producción de carbón activado (c.a.) con capacidad de producción de 600 a 700 t/a según rendimiento. Sin embargo, y contrastando con lo antes planteado el carbón activado que actualmente consume el país en la industria médico farmacéutica es adquirido en el mercado internacional a un precio superior a los 5 500 USD/t (Norit, Holanda; Panreac, República Popular China y otras). Esta

materia prima se destina a la confección de tabletas de carbón y pepsina y suspensión antídoto para la destoxificación mediante diálisis gastrointestinal de pacientes intoxicados por diferentes sustancias.¹⁻⁵

Actualmente, el Ministerio de Salud Pública dentro de su programa nacional de salud ha propuesto un botiquín antitóxico para todos los hospitales y hogares del país dentro del cual incluye el carbón activado como antídoto y para el tratamiento de desarreglos digestivos

(gases intestinales, síntomas de flatulencia, distensión abdominal y dispepsia; coadyuvante en el tratamiento de la diarrea y la halitosis). Como se puede apreciar es más que necesaria la existencia del c.a. como medicamento de urgencia para aliviar preventivamente la salud de la población.

Para que el c.a. producido en la planta de Baracoa (M) pueda insertarse en la industria médico farmacéutica es necesario transformarlo en una materia prima adecuada para estos fines. Entiéndase que este material industrial debe ser sometido a un proceso de purificación química que permita eliminar las impurezas inorgánicas que componen las cenizas de este producto hasta alcanzar los niveles que establecen las normas nacionales e internacionales para materiales de esta naturaleza.^{6,7} En el estudio, se consideran otros aspectos relacionados con la determinación de microelementos (Ca, K, Mg, Zn, Na y Cu) y capacidad de adsorción selectiva y que conjuntamente con el resto de los indicadores definen la calidad del c.a. para los fines propuestos. La necesidad de exigir un elevado nivel de pureza química en el carbón activado está fundamentada en que durante el proceso de destoxificación el carbón tiene que actuar en un medio eminentemente ácido, jugo gástrico (pH = 1 - 3) formado mayoritariamente por HCl, condición suficiente para que por lixiviación ácida sea extraída una gran cantidad de impurezas, tanto orgánicas como inorgánicas, que originalmente están presentes en el material de partida (M). Dichas impurezas alcanzan niveles superiores a los establecidos por las normas citadas anteriormente. El efecto inmediato sería el aporte de compuestos no deseables al sistema henterohepático al aplicar el carbón activado durante la etapa clínica de destoxificación. Queda evidentemente claro, en este trabajo, que la purificación química realizada no afecta las propiedades adsorbentes de M1, cuyos resultados no difieren con los reportados de los patrones internacionales USPXX Norit y RPCh.

El objetivo principal del presente trabajo consistió en evaluar un proceso de purificación de un carbón activado cubano de calidad USP 30 para uso médico farmacéutico a partir de su caracterización mediante patrones internacionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Procedencia y selección de las muestras en estudio

La muestra de carbón activado (M) fue obtenida en la planta industrial de carbón activado ubicada en el municipio de Baracoa de la provincia de Guantánamo, producida a partir de carbón de madera de la especie *Equisetifolia forte*, más conocida como pino de playa. Este material fue procesado por la vía de la activación física (gasificación parcial) en un horno del tipo tubular y rotatorio con capacidad de producción entre 600 a 700 t/a y rendimiento variable según intereses comerciales. La activación fue realizada con vapor de agua como agente activante principal, con una relación en peso vapor /carbón (3/1) y temperaturas de activación que pueden encontrarse entre 850, 900 y 950 °C. Una muestra representativa de 50 kg de carbón activado granular obtenido por muestreo aleatorio (para un día de producción) fue seleccionada para el estudio. La muestra fue molida a polvo (100 % bajo tamiz de 250 µm), se cuarteó y homogenizó posteriormente. Se tomaron 40 kg del compuesto final para el estudio de purificación a escala de banco. El indicador fundamental que se consideró durante el muestreo fue el índice de iodo (mg/g). Según lo establecido por la USP 30 la selección de un carbón activado para estos

fines, en principio, debe cumplir con un índice de iodo ≥ 950 mg/g (ASTM D 4607). Los controles de calidad históricos de la planta de carbón activado se comportan con media de 965,3 mg/g. Los análisis del laboratorio de tecnología de materiales reportaron una media de índice de iodo de 968,7 mg/g. Los carbones activados grado farmacéutico USPXX Norit (Holanda o Alemania) y RPCh (China) son materiales importados por Cuba.

PARTE EXPERIMENTAL

Análisis físico químicos

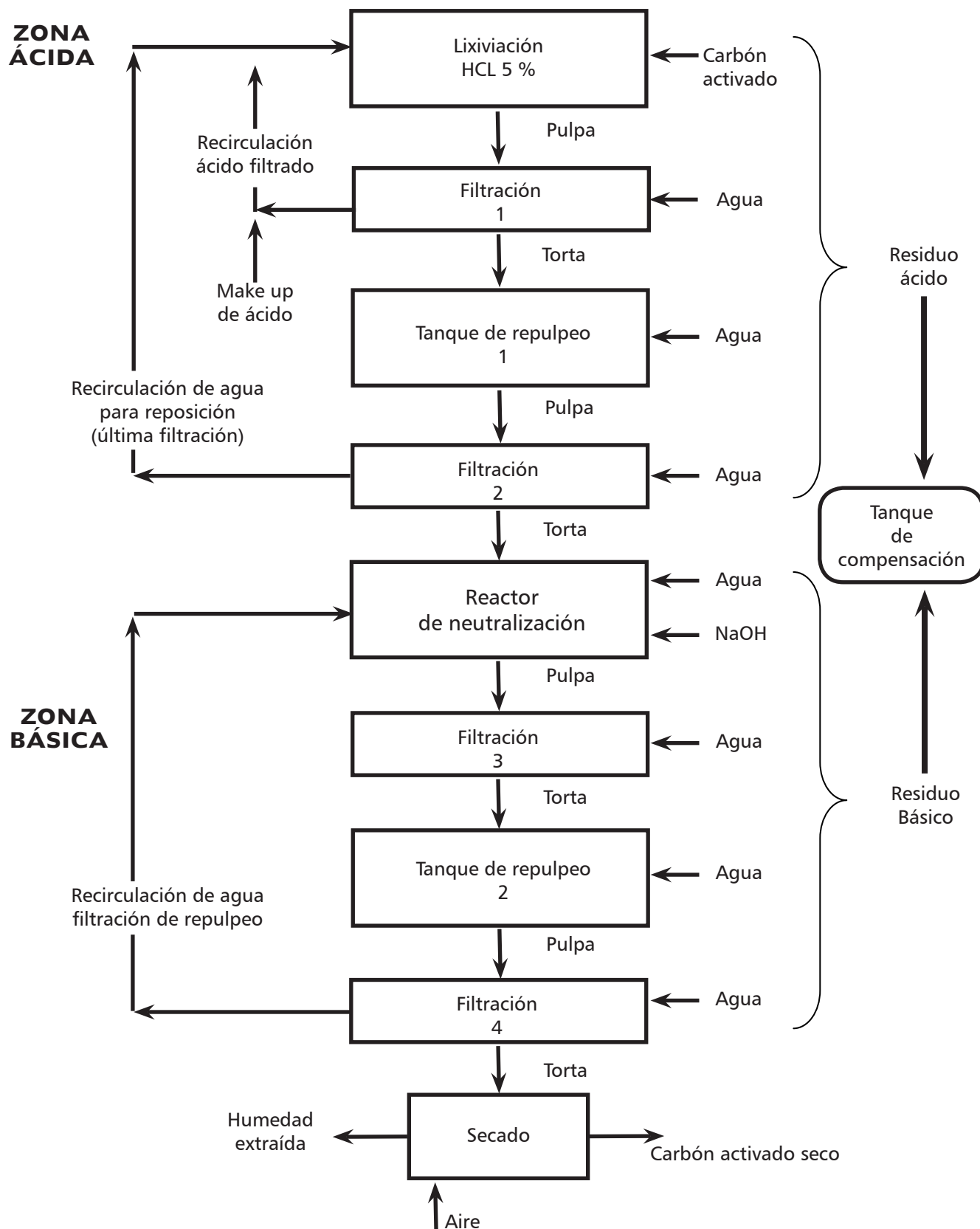
Sobre la base principalmente de las normas de la Farmacopea 30 y de la Asociación para la Prueba/Ensayo de Materiales de Estados Unidos, se determinaron los componentes inorgánicos asociados a la ceniza de las muestras empleando para ello análisis por ICP-AES y absorción atómica. Se determinó además, el poder de adsorción puntual en: alcaloides, azul de metileno, iodo y melaza. Otros análisis de interés fueron: elementos no carbonizables, cenizas, humedad y pH.⁸⁻¹²

Procedimiento tecnológico y equipamiento utilizado

Para el desarrollo de esta etapa se empleó un reactor de 20 L de vidrio con fondo ovalado, cuatro cortacorrientes (baffles), con motor vertical acoplado a un agitador de cuatro paletas planas abiertas del tipo turbina. La lixiviación se realizó con disoluciones de HCl 5 % y tiempo de lixiviación de 15 min. Durante el proceso se consideró aprovechar los licores intermedios de la filtración ácida y también el agua de lavado por desplazamientos durante las etapas de filtración para la preparación de disoluciones ácidas y básicas. La estrategia básica fue considerar un ciclo de cinco lixivaciones. El porcentaje de HCl que reaccionaba durante cada lixiviación, excepto la primera, era repuesto (*make up*), así como su correspondiente volumen de agua, hasta completar los 15 L de solución de HCl al 5 %. En todos los casos, se trabajó con una cantidad de 6 kg de carbón activado más la disolución correspondiente. Este volumen de material ocupaba aproximadamente el 85 % del volumen total del reactor. El proceso de secado se realizó en un secador del tipo estático con recirculación de aire, cuya operación y características se referirán más adelante. El envase del material obtenido se realizó en sacos multicapas con bolsas de nylon de 35 a 40 °C. El esquema 1 muestra las diferentes etapas del proceso, así como la recirculación de los licores y la secuencia operativa general del proceso.

Estrategia general de purificación

1. Lixiviación ácida en una relación constante sólido /líquido = 1/3.
2. Filtración de la pulpa y desplazamiento de la torta con agua en una relación sólido/líquido = 1/2.
3. Lavado, por repulpeo de la torta con agua desionizada en una relación sólido/líquido = 1/3, t = 30 min.
4. Filtración de la pulpa y desplazamiento de la torta con agua en una relación sólido/líquido = 1/2.
5. Nerutralización de la pulpa con NaOH (200 g/L), pH = 6 - 7.
6. Filtración de la pulpa y desplazamiento de la torta con agua en una relación sólido/líquido = 1/2.
7. Lavado, por repulpeo de la torta con agua desionizada en una relación sólido/líquido = 1/3, t = 30 min.
8. Filtración de la pulpa y desplazamiento de la torta con agua en una relación sólido/líquido = 1/2.
9. Secado.



Esquema 1. Diagrama de flujo del proceso de purificación.

Caracterización de la pulpa de carbón activado

Como una de las etapas básicas del proceso de purificación es la filtración, la cual se repite constantemente durante él, fue imprescindible caracterizar el comportamiento de la pulpa de carbón activado ya neutralizada. Para ello, se montó una pequeña instalación conformada básicamente por un filtro del tipo buchner recubierto en su interior (placa perforada) con una tela de filtración

antiácida como medio filtrante, bomba de vacío, facómetro y una vasija receptora debidamente calibrada según la norma para la filtración de pulpas.¹³

Secado de la torta de carbón activado

El estudio de secado de la torta filtrada fue realizado en un secador estático de bandejas con recirculación de aire con capacidad para tres bandejas con las dimen-

siones siguientes: largo = 46 cm, ancho = 40 cm y alto = 2,5 cm. Las condiciones de secado fueron las siguientes: velocidad del aire = 120 m/min, temperatura de secado = 120 °C, recirculación de aire = 85 a 87 %, peso de muestra por bandejas = 2 250 g (51,3 % humedad base húmeda). Las bandejas se pesaban a intervalos regulares de tiempo y por diferencia se determinaban las pérdidas de agua. Esta operación se realizó en cinco tiempos diferentes y con tres réplicas por punto.

Isoterma de adsorción de CO₂ a 273 K

Las isothermas se obtuvieron en un equipo analizador de superficies ASAP 2010 System (Micromeritics). El procedimiento operativo se detalla y explica en el manual de operación del equipo. Las isothermas de CO₂ (tipo I) obtenidas, se ajustaron por el modelo de Dubinin y Radushkevich (D-R) de un solo término, el cual describe satisfactoriamente la adsorción de vapores en sólidos microporosos, a temperaturas por debajo de la crítica del adsorbato. El desarrollo de esta teoría se basa en el concepto de curva característica y potencial de adsorción de Polanyi ($\partial E/\partial T = 0$), cuya ecuación se puede representar como sigue:¹³⁻¹⁵

$$N_a = N_M \cdot \exp \left[- \left(\frac{G}{E_o} \right)^2 \right] \quad (1)$$

donde:

N_a cantidad adsorbida en los microporos a la presión de equilibrio (P_e).

N_M adsorción máxima en los microporos (mmol/g).

E_o energía característica de adsorción (J/mol).

G energía libre de Gibbs.

Al representar la ecuación en su forma logarítmica en un sistema de ejes coordenados, se obtiene una línea recta de cuyo intercepto con la ordenada, se calcula la N_M y de su pendiente la E_o .

$$\ln N_a = \ln N_M - \left(\frac{R \times T}{E_o} \right)^2 \cdot \left(\ln \frac{P_v}{P_e} \right)^2 \quad (2)$$

donde:

R constante de los gases ideales [8,31 J/(mol · K)].

P_v presión de vapor del CO₂.

T temperatura absoluta (K).

P_e presión de equilibrio del CO₂.

Una vez calculada la adsorción máxima y la energía característica, el radio medio y el volumen de microporos se determinan por las expresiones siguientes:

$$R_g = \frac{K}{E_o} \quad (3)$$

$$V_p = N_M \cdot V_M \quad (4)$$

donde:

R_g radio de giro (nm).

V_p volumen de poro (cm³/g).

K 14,8 (kJ · nm)/mol.

V_M volumen molar del CO₂ (cm³/mol).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis físico químicos

Las diferentes muestras de carbones activados: USPXX Norit, RPCh y M fueron analizadas por diferentes técnicas analíticas y de adsorción (Tabla 1). Mediante ellas (columna 5) se calculó porcentualmente la cantidad de impurezas que debía removerse del carbón M para lograr alcanzar los niveles de pureza de los patrones de referencia.

Durante el proceso de purificación (carbón M), cada lote de carbón activado obtenido fue clasificado según un número de serie (1 a 5) y posteriormente, caracterizado individualmente (Tabla 2). Estos resultados corroboraron que la recirculación de licores y su aprovechamiento,

Tabla 1. Análisis físico químico de los carbones en estudio.

Tipo de Análisis	USPXX Norit	RPCh	*M	Impurezas a remover de M**
Magnesio (%)	0,054	0,02	0,15	64 %
Calcio (%)	0,058	0,027	0,64	91 %
Cinc (%)	0,003	0,005	0,012	68 %
Potasio (%)	0,037	0,033	0,59	94 %
Sodio (%)	0,058	0,097	0,26	77,6 %
Cobre (%)	0,000 96	0,001	0,011	91 %
Cianuro (%)	0	0	0	cumple
Arsénico (%)	0	0	0	cumple
Cloruros (%)	< < 0,2	< < 0,2	< < 0,2	cumple
Sulfatos (%)	< < 0,2	< < 0,2	< < 0,2	cumple
Sulfuros (%)	0	0	0	cumple
Metales pesados (%)	< 0,005	< 0,005	< 0,005	cumple
Cenizas (%)	2,88	1,47	7,23	60,2 %
Sustancias extraíbles en ácido (%)	0,84	0,26	8,3	89,9 %
Sustancias extraíbles en agua (%)	0,19	0,65	0,95	80 %
Humedad (%)	8,5	10	20	57 %
Índice de yodo (mg/g)	950	954	969	cumple
Melaza (%)	89	88	77	cumple
pH	6,9	7,2	8,8	21,6 %

* M Carbón activado de producción nacional sin purificar que sirvió de base para obtener el M1. ** Contenido de impurezas a eliminar de M tomando como referencia la USPXX Norit.

durante los cinco ciclos propuestos, no afectan la pureza química del material final, contribuyendo con esto al ahorro de insumos. Otro ahorro, que no deja de ser importante, se logra al trabajar el proceso a temperatura ambiente. Este aspecto no entra en contradicción con procesos similares, puesto que ellos pueden realizarse en un amplio intervalo de temperatura (25 a 80 °C) y con el empleo de diferentes agentes lixiviantes e incluso con mezclas de estos.⁹ Detalles del control del proceso que corresponden con el balance de materiales y tiempos operativos realizados se muestran en el esquema 1 y las tablas 3 y 4.

Análisis físico químicos y de adsorción de la muestra M1

Las cantidades de ca obtenidas de cada serie (1-5) fueron mezcladas y homogenizadas para conformar el

lote M1 (21,12 kg), (Tablas 5 y 6). Una comparación estadística mediante la prueba de hipótesis para la media reveló la no existencia de diferencias significativas para un $\alpha = 0,05$ % entre las características comparativas de estos materiales. Se realizaron más de 30 análisis a cada muestra de carbón activado (USP XX Norit, RPCh y M1) y todas se ubican sin excepción en el intervalo permisible establecido por las normas USP 30 para uso de estos materiales en la industria médico farmacéutica (Tablas 5 y 6). Es de destacar que para aplicaciones en fase líquida es favorable que estos adsorbentes tengan buen desarrollo de microporos anchos y mesoporos estrechos, así como un elevado volumen de macroporos; características que facilitan la difusión de los líquidos hacia los sitios donde ocurre la adsorción. Lo antes mencionado se corrobora a través del análisis de adsorción puntual. Este tipo de

Tabla 2. Análisis físico químico de los carbones obtenidos bajo el procedimiento tecnológico propuesto en el esquema 1 (serie1 a 5).

Parámetro	Carbones activados						
	M	1	2	3	4	5	USP XX
Materia soluble en H ₂ O (%)	0,95	0,11	0,09	0,083	0,12	0,13	0,19
Materia soluble en ácido (%)	8,30	0,35	0,41	0,29	0,3	0,27	0,84
Cenizas (%)	7,23	1,35	1,2	1,19	1,4	1,37	2,88
Magnesio (%)	0,15	0,025	0,019	0,023	0,03	0,027	0,054
Calcio (%)	0,64	0,009	0,008 5	0,007 4	0,011	0,009 3	0,058
Potasio (%)	0,59	0,075	0,073	0,074	0,072	0,076	0,037
Sodio (%)	0,26	0,051	0,048	0,052	0,056	0,045	0,058
Cobre (%)	0,011	0,000 76	0,000 8	0,000 75	0,000 72	0,000 77	0,000 96
Cinc (%)	0,012	0,002 7	0,003	0,002 5	0,003 7	0,002 6	0,003

Tabla 3. Control cuantitativo del proceso de purificación para el balance de materiales.

Muestra	Peso inicial ca (kg)	Humedad inicial (%)	Vol. inicial HCl (L)	Vol. HCl filtrado (L)	Pureza inicial HCl (%)	Consumo NaOH (L)	Pureza final HCl (%)	Make up H ₂ O (L)	Make up HCl 32 % (L)	Rend. Final ca ¹ (%)	pH
1	6	20,6	15	11,50	5,49	0,425	2,57	—	—	85,0	6,9
2	6	19,7	15	11,30	5,40	0,400	2,59	2,585	1,4	84,0	7,0
3	6	20,1	15	11,25	5,26	0,425	2,62	2,420	1,3	84,6	7,0
4	6	20,0	15	11,00	5,14	0,410	2,60	2,647	1,3	83,6	7,2
5	6	19,6	15	11,30	5,19	0,435	2,63	2,640	1,4	85,2	7,1
Promedios	6	20,0	15	11,27	5, 4	419	2,60	2,573	1,35	84,4	7,04

ca Carbón activado. Vol. Volumen. * Con humedad < 6 %. Rend. Rendimiento.

Tabla 4. Tiempos de operación en cada etapa del proceso de purificación.

Tiempo de lixiviación	30 min	Tercer desplazamiento	5 min
Primera filtración de la pulpa	5 min	Repulpeo	10 min
Primer desplazamiento	5 min	Cuarta filtración de la pulpa	5 min
Repulpeo	10 min	Cuarto desplazamiento	5 min
Segunda filtración de la pulpa	5 min	Tiempo total de la etapa de purificación	1,67 h
Segundo desplazamiento	5 min	Secado = f (% humedad deseado)	≈ 5 a 6 h
Neutralización	30 min	Tiempo total del proceso	≈ 8 h
Tercera filtración de la pulpa	5 min		

Tabla 5. Análisis granulométrico por vía húmeda.

Tipo de carbón	Distribución granulométrica		
USPXX Norit	Apartado Postal 6414,	22,7 % > 63 μ m	53,3 % < 32 μ m
RPCh	100 % < 250 μ m	8 % > 63 μ m	67,3 % < 32 μ m
M1	100 % < 250 μ m	20,5 % > 63 μ m	55 % < 32 μ m
Norma	100 % < 250 μ m	20 % > 63 μ m	60 % < 32 μ m

M1 Carbón activado en estudio.

Tabla 6. Análisis químico de los carbones en estudio y poder de adsorción.

Índices	USPXX Norit	M1	RPCh
Magnesio (%)	0,054	0,025	0,020
Calcio (%)	0,058	0,007	0,027
Cinc (%)	0,003	0,0028	0,0051
Potasio (%)	0,037	0,051	0,033
Sodio (%)	0,058	0,045	0,097
Cobre (%)	0,000 96	0,001 0	0,001 2
Cianuro (%)	no	no	no
Arsénico (%)	no	no	no
Cloruros (%)	< < 0,2	< < 0,2	< < 0,2
Sulfatos (%)	< < 0,2	< < 0,2	< < 0,2
Sulfuros (%)	no	no	no
Metales pesados (%)	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Cenizas (%)	2,88	1,06	1,47
Sustancias extraíbles en HCl (%)	0,84	0,32	0,26
Sustancias extraíbles en H ₂ O (%)	0,95	0,11	0,65
Humedad (%)	8,5	6	10
No carbonizables	Responde	Responde	Responde
Reactividad	Neutro al litmus	Neutro al litmus	Neutro al litmus
Índice de iodo (mg/g)	950	1050	940
Adsorción de melaza (%)	89	77	88
Adsorción de alcaloides	No turbidez	No turbidez	No turbidez
Adsorción de azul de metileno	< 0,7 mL	< 0,7 mL	< 0,7 mL
pH	6,9	7,13	7,2
¹ Control microbiológico	cumple	cumple	cumple

¹ Todas las muestras cumplen la norma de estar libre de agentes microbiológicos antes y después de ser envasadas: bacterias, hongos, enterobacteriáceas, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Candida* sp.

prueba es representativa de la adsorción de moléculas de diferentes tamaños como se explica a continuación. La disolución de melaza es un compuesto de sustancias coloreadas de origen variado, con tamaño promedio de 3 nm y disueltas en un medio ligeramente ácido (pH = 6,5) que caracteriza en gran medida la porosidad estrecha de los mesoporos. La molécula de iodo (halógeno), por ejemplo tiene un tamaño aproximado de 1 nm valor, que junto al azul de metileno (colorante básico) de 1,2 nm caracterizan la región microporosa de estos sólidos. El valor de la adsorción de iodo es tomado como una aproximación bastante acertada del área superficial total de los carbones activados.¹⁻⁴ El sulfato de estriquina (C₂₁H₂₂N₂O₂₁/2H₂SO₄) es un alcaloide del tipo indólico. Estos contienen en sus moléculas sistemas heterocíclicos nitrogenados con base estriquina y tienen un carácter básico (pKa = 8). En general, los alcaloides a pesar de sus disímiles estructuras, poseen propiedades fisioló-

gicas análogas. El pH alto es un factor importante en la absorción de estas drogas. Cuando se encuentran no ionizadas se adsorben rápidamente en el estómago por difusión lipoidea o por difusión acuosa si son de bajo peso molecular. El sulfato de estriquina manifiesta en disolución un comportamiento completamente diferente al fenobarbital (ácido débil), sin embargo, ambos compuestos son bien adsorbidos por los carbones activados estudiados. Esto pone de relieve que las propiedades superficiales de estos adsorbentes determinan en gran medida la efectividad para remover sustancias de disoluciones líquidas débilmente básicas y ácidas. Un complemento adicional, y no menos importante, es que todos los adsorbatos probados presentan propiedades físico químicas totalmente diferentes. También en este aspecto desempeña un papel importante el área superficial reportada en este caso por el No. de iodo, que es la encargada de aumentar la fase de contacto y permitir la

vía de acceso entre los grupos funcionales, la porosidad y el adsorbato.

Análisis de la pulpa de carbón activado

Mediante el análisis de la pulpa de carbón activado se pudo seleccionar el tipo de filtro más adecuado según la categoría de filtrabilidad. Asimismo, se logró una filtrabilidad de categoría media y lo más recomendable fue un filtro del tipo bandeja (Tabla 7).

Secado de la torta de carbón

Se pudo conocer el tiempo necesario para alcanzar un determinado valor de humedad en el material empleando directamente la figura 1.

Análisis textural por adsorción de CO₂ a 273 K

Las isothermas obtenidas son del tipo I según clasificación IUPAC correspondiente a materiales microporosos con superficie externa relativamente pequeña (Fig. 2). El CO₂ presenta una característica muy interesante y es que al ser la presión de vapor de éste (3 587 kPa) a la temperatura del experimento (273 K) mucho más elevada que las del NH₃ (444 kPa) y H₂O (< 3,6 kPa), el intervalo de presiones relativas con las que se puede trabajar resulta muy bajo y es por esa razón, que la adsorción ocurre en los microporos, con lo que se obtiene solo la parte inicial de la isoterma prácticamente sin la influencia de la porosidad secundaria. Es precisamente esta parte la que corresponde al ajuste en coordenadas de Dubinin (Fig. 3 y Tabla 8). La energía característica por ser baja no revela una porosidad muy estrecha, lo que indica además, una baja afinidad entre los carbones y el CO₂. Es de destacar que estos materiales poseen un volumen de microporos considerable, lo que contribuye favorablemente, como se explicó anteriormente, a una mejor combinación funcional entre los diversos matices constitucionales o funcionales: porosidad, grupos funcionales, pH, distribución de poros y otros parámetros, a ejercer un efecto sinérgico que de manera certera den una respuesta positiva a su aplicación.

Estudio de prefactibilidad de la propuesta tecnológica

Los resultados revelaron la posibilidad de proyectar una planta de producción con capacidad de 60 t. La capacidad productiva de esta planta no solo contempló la demanda de la industria médico farmacéutica, sino, que se incluyeron además, otros sectores que deman-

dan carbones de elevada pureza como son: los procesos biotecnológicos y de los laboratorios de análisis químicos. La tabla 9 y la figura 4 resumen los índices técnico económicos y los flujos de caja financieros correspondientes a la planta que se propone, los cuales se pueden considerar bastante conservadores teniendo en cuenta el nivel (pequeña escala) al que se realizó este estudio. Con esta propuesta el país pudiera ahorrar por concepto de

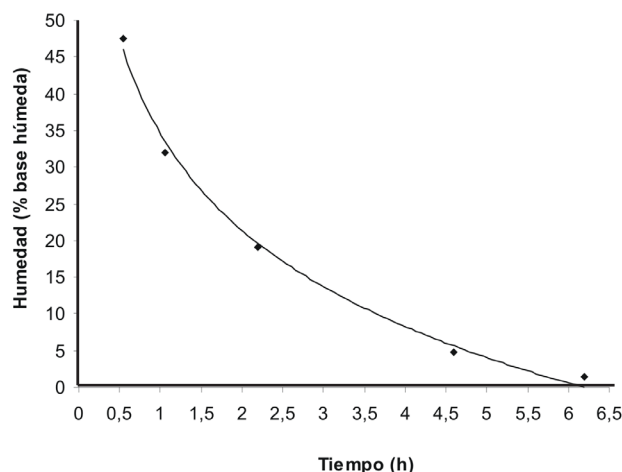


Fig. 1. Secado isotérmico de la torta filtrada de carbón activado, $\text{humedad (\%)} = -18,9 \ln(t) + 34,50$ y $R^2 = 0,995$.

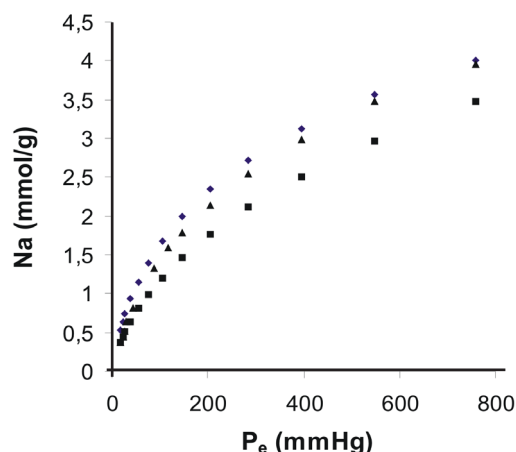


Fig. 2. Isothermas de adsorción de CO₂ a 273 K. (■ M1 ♦ USPXX Norit ▲ RPCh).

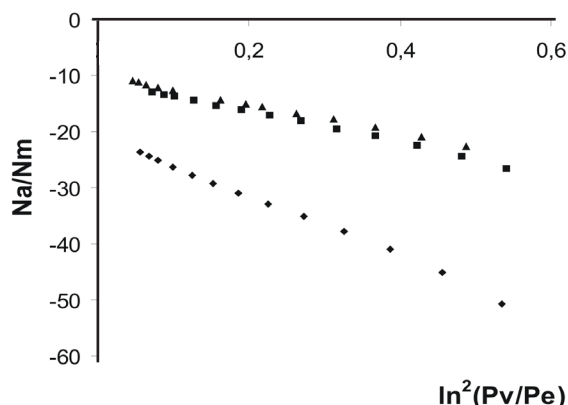


Fig. 3. Isothermas de adsorción de CO₂ a 273 K ajustadas en coordenadas de Dubinin (■ M1 ♦ USPXX Norit ▲ RPCh).

Tabla 7. Caracterización de la pulpa de carbón activado M1 neutralizada.

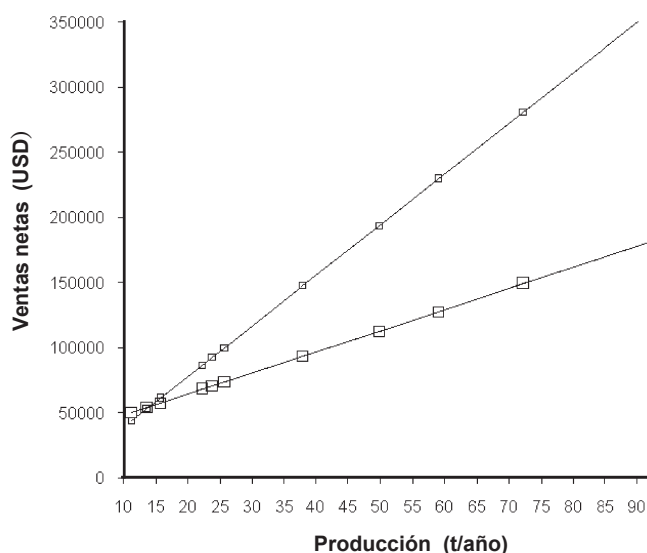
Parámetro	Valor
Peso seco (g)	365,30
Volumen filtrado (L)	1,55
Tiempo de filtración (min)	5
Espesor de la torta (cm)	5,56
Área de filtración (cm²)	70,85
Presión de vacío (mmHg)	650
Velocidad de filtración (L/m² h)	2 625
Capacidad de filtrado (t/m² h)	0,62
Rapidez de crecimiento de la torta (cm/min)	1,11
Sólidos (%)	25
Filtración media (8.6 a 215 L/(m² · min)	43,75
Tela filtrante utilizada	antiácida

Tabla 8. Parámetros característicos de la ecuación de D-R.

Tipo de carbón	N _M	E _o	R _g	V _p	r ²
USPXX Norit	6,505	9 723,25	1,52	0,312	0,998
RPCh	8,136	9 518,86	1,55	0,390	0,999
M1	7,399	10 249,60	1,45	0,354	0,999

Tabla 9. Principales índices económicos considerados en el estudio de prefactibilidad del procedimiento de obtención del carbón M1.

Índice	Valor
Inversión	120 398 USD
Interés bancario	14 %
Costo de producción del M1	2 183,55 USD
Valor actual neto (VAN)	Positiva a partir del 2do año de la inversión
Tasa interna de retorno (TIR)	61 %
Plazo de recuperación de la inversión (PRI)	1,64 años
Eficiencia Económica (EE)	0,6 %
Precio estimado de venta de M1	3 225 USD
Punto de equilibrio	Volumen = 14 t y valor = 60 000 USD

**Fig. 4.** Estimación de las ventas en función de la capacidad de producción de la planta.

importación alrededor de 136 500 USD anuales y pondría a disposición de las instituciones cubanas un producto cubano competitivo.¹⁶⁻²¹

CONCLUSIONES

El desarrollo de este procedimiento tecnológico permitió obtener un material de base carbón activado producido en Cuba con suficiente pureza y capacidad de adsorción para cumplir con lo establecido por la farmacopea USP 30 y las normas cubanas. La efectividad del procedimiento se aprecia en que no se encontraron diferencias significativas, para $\alpha = 0,05$ %, con relación a los patrones internacionales. Se debe señalar además, que la sencillez del método de purificación permite que este pueda ser implementado en Cuba a un costo de inversión ventajoso. Los índices económicos tomados en cuenta, así lo confirman. Por tales razones, los re-

sultados alcanzados confirman que el carbón activado cubano estudiado puede ser considerado un posible candidato como materia prima para la industria médico farmacéutica.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Investigaciones de Medicamentos por los análisis microbiológicos realizados a las muestras de carbón activado; al Laboratorio "Reinaldo Gutiérrez" por brindar su experiencia y colaborar abiertamente con este proyecto y al Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica por las mediciones aportadas por ACIP/AES y personal de apoyo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Desphande R, Proudlove A and McLean W. M. A review of the methods to prevent absorption of ingested poisons. Clinical Toxicology Service, Pharmacy - Drug Consultation Services. Ottawa General Hospital, July, 1985.
- Alaspaa O., Kvisma J., Happu K. and Neuvone P. Feasibility activated charcoal given prehospital by emergency medical system in acute intoxication. Journal of Toxicology. 2000;38: 152-156.
- Ho J, Tierney M and Dickinson G. An Evaluation of Effect of Repeated Doses of Oral Activated Charcoal on Salicylate Elimination. J Clin Pharmacol. 1989;29:366-369.
- Cooney D. Activated Charcoal in Medical Applications. Chapter 25. Editor Thrower PA. New York: Marcel Dekker: 1993:312-334.
- Pond M. Role of repeated oral doses of activated charcoal in clinical toxicology. Medical Toxicology. 1986;4:35-59.
- Gonikberg E. United States Pharmacopeia 27- NF22 Supplement 1. Activated Charcoal, Pharmaceutical Analysis. 2002;4:403.
- American Society for Testing and Materials. Standards on activated carbon. 2ed Sponsored by ASTM Committee D-28 an activated carbon. 2000;p.11-17.
- Smisek M and Cerny S. Active Carbon, Manufacture, Properties and Applications, 1970.
- Rey Mafull CA. Carbón activado de producción nacional como antídoto en humanos. Tesis presentada en opción al título de Máster en Ciencia de Materiales, Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales, Universidad de la Habana, 2007.

10. Rey Mafull CA y cols. Estudio comparativo del carbón activado M1 de producción nacional para su uso como antídoto. *Revista CENIC Ciencias Químicas*. 2007;8(3):389.
11. Moreno JC y cols. Sólidos porosos, preparación, caracterización y aplicaciones, Capítulo 1. El carbón activado como adsorbente universal, primera edición, Colombia: Ediciones Uniandes: 2007:p.1-42,
12. Barraza J, Mejia I. Producción de carbones ultralimpios usando flotación burbujeante y lixiviación con ácidos, *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*. 2009;(49) septiembre:50-60.
13. Ministerio de la Industria Básica de la República de Cuba, Ensayos físico mecánicos. Características de la filtración de pulpas, NRBI-389, 1981.
14. Micromeritics Instrument Corporation. Micromeritics Accelerated Surface Area and Porosimetry (ASAP) System 2010. Chapter 10. Operator's Manual. 1998: August: 1998:p.10-50.
15. International Union of Pure and applied Chemistry. Manual of Symbols and Terminology. Appendix 2, Part 1, Colloid and Surface Chemistry Pure and App Chem. 1972;31:578.
16. Smisek M and Cerny S. Active Carbon, Manufacture, Properties and Applications, Chapter 4. Elsevier Publishing Company: 1970:p.71-162.
17. Anzil F. Economía y Planta. Criterios de Decisión. Consultado: 20 de marzo de 2010. Disponible en: <http://www.econlink.com.ar>, 2005.
18. Anzil F. Textos de Análisis Económico Consultado: 14 de febrero de 2009. Disponible en: <http://www.econlink.com.ar>, 2004.
19. Macareñas J. La Valoración de Proyectos de Inversión Productivos, Universidad Complutense de Madrid. Capítulo 10. Madrid: Editorial Pirámide: septiembre, 2001:p 5-15.
20. Graham J, Harvey C. The Theory and Practical of corporate finance: evidence from the field. *Journal of Financial Economics*. 2001;60:187-24.
21. Ramos G. Tamaño Óptimo de Plantas Industriales, *Dyna*. 2000;(130):p.21-30.