

SÍNTESIS DE CARBONES ACTIVADOS MAGNÉTICOS A PARTIR DE CASCARÓN DE COCO

SYNTHESIS OF ACTIVATED MAGNETIC CARBONS FROM COCONUT SHELL

Silvia Virginia Ruiz ⁽¹⁾, Dolly Lucía Granados ⁽¹⁾, Idalberto García Fernández ⁽²⁾, Blasa Caridad Delgado Diéz ⁽²⁾, Hugo Soé Silva ⁽¹⁾

Los carbones activados magnéticos (CAMs) son materiales que tienen alta eficiencia para la captación de moléculas de interés, presentes en soluciones diluidas. Se preparan dispersando partículas con propiedades magnéticas sobre la superficie de carbón activado.

Usando un electroimán, los sólidos compuestos se remueven rápidamente de la corriente líquida compitiendo con ventaja respecto de la filtración. Se sintetizaron materiales compuestos del tipo [carbón activado/óxidos de hierro]. El carbón activado se obtuvo a partir de residuos de cascarón de coco, lo que permite simultáneamente la obtención de un material de alto valor agregado a partir de un residuo industrial y dar una solución al problema del destino final al residuo mencionado. Se llevaron a cabo diferentes rutas de síntesis para obtener CAMs a partir de cáscara de coco como materia prima. Se analizaron las variaciones en la estructura porosa del adsorbente por el enclavado de los óxidos de hierro. Se evaluaron las características de la fase magnética (ordenamiento cristalino por DRX, dispersión sobre la matriz carbonosa por EDS y magnetización frente a un campo magnético variable).

Palabras clave: Carbón activado, propiedades magnéticas, cascarón de coco.

Magnetic activated carbons (MACs) are materials having high efficiency for capturing molecules of interest present in dilute solutions. They are prepared by dispersing particles with magnetic properties onto the surface of activated carbon. By using an electromagnet, the composites are rapidly removed from the liquid stream, which competes advantageously with the filtration process.

Composite materials of the type [iron oxides/activated carbon], were synthesized. Activated carbon was obtained from coconut shell waste which simultaneously allows to obtain a high added value product from an industrial residue and gives a solution for its final destination. In order to obtain CAMs, different protocols of synthesis were carried out from coconut shell as starting material. Variation in the porous structure of the adsorbent due to the nested iron oxides was analyzed. Magnetic phase properties (crystalline order by XRD, dispersion onto the carbonaceous matrix by EDS, and magnetization under a variable magnetic field), were evaluated.

Keywords: Activated carbon; magnetic properties; coconut shell

Recibido: 20 de marzo del 2015

Aprobado en su forma original: 18 de mayo del 2015

(1) Instituto de Ingeniería Química – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de San Juan – Argentina, Av. Libertador San Martín 1109 (Oeste)- Dpto. Capital – (5400) San Juan – Argentina Correo electrónico:

hsilva@unsj.edu.ar

(2) Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM), Varona 12028 Km1^{1/2} Boyeros, La Habana, Cuba, CP-10800 Correo electrónico: idalberto@cipimm.minem.cu

INTRODUCCIÓN

Los carbones activados son adsorbentes universales, con propiedades excepcionales debido a las altas áreas desarrolladas por unidad de masa de sólido, que los compara ventajosamente frente a otros adsorbentes. Han sido usados desde hace tiempo para la captación de contaminantes de corrientes líquidas o gaseosas y tienen la ventaja de que pueden obtenerse a partir de una amplia variedad de materias primas carbonosas, incluyendo residuos de actividades industriales (Alexandre-Franco *et al.*, 2011; Amaya *et al.*, 2007; Baçaoui *et al.*, 2001; Gutiérrez-Segura *et al.*, 2012). Esto permite simultáneamente la obtención de un material de alto valor agregado a partir de un desecho industrial y dar una solución al problema del destino final al residuo mencionado

Los carbones activados no sólo deben tener propiedades fisicoquímicas, sino también resistencia mecánica adecuadas, para que puedan usarse en unidades de operación industrial. La resistencia mecánica de estos adsorbentes depende básicamente de la materia prima y en aquellos casos en que no puede utilizarse en forma granular en las unidades de producción, deben agregarse etapas de particulado (en forma de pellets, briquetas, etc.) en la ruta de síntesis, para hacerlos aptos para utilizarlos en las unidades de proceso (Deiana *et al.*, 2004). Aún así, hay ciertos procesos industriales, en el que el manipuleo de los sólidos (procesos de carbón en lixiviación -CIL- y carbón en pulpa -CIP-) produce una cantidad de finos debidos al desgaste de los adsorbentes, que afectan no sólo la economía del proceso sino que dificultan grandemente las operaciones de separación de sólidos de las corrientes líquidas y por filtración.

Para superar los problemas expuestos, se ha propuesto incorporar una fase magnética a la matriz porosa del adsorbente (Ao *et al.*, 2008; Gorria, *et al.*, 2006; Kahani *et al.*, 2007; Schwickardi *et al.*, 2006). Se preparan dispersando partículas con propiedades magnéticas sobre la superficie de carbón

activado. Estos sólidos porosos tienen una alta capacidad de adsorción para una variedad de compuestos orgánicos solubles y para metales pesados, entre otras aplicaciones (Ai *et al.*, 2010; Castro *et al.*, 2009; Gholamvaisia *et al.*, 2014, Kakavandi *et al.*, 2013; Mohan *et al.*, 2012; Wan *et al.* 2014; Yang N. *et al.*, 2008; Zhang J. *et al.*, 2011).

Usando un campo magnético, los sólidos compuestos se separan rápidamente de la corriente líquida compitiendo con ventaja respecto de la filtración.

Un carbón activado magnético debe cumplir con dos propiedades fundamentales: la capacidad de captación de una molécula de interés por el sólido poroso y la facilidad con que el sólido saturado puede ser separado con eficiencia por un campo magnético externo.

Esto requiere básicamente que la estructura porosa del adsorbente no sea modificada sustancialmente por la entrada de la fase magnética (bloqueo de poros, por ejemplo) y que el anclaje de la fase magnética (nanoimanes) al soporte, sea efectivo para evitar su desprendimiento hacia la fase fluida

Para aplicaciones, tales como operaciones de separación, es conveniente que los nanoimanes presenten un comportamiento superparamagnético a temperatura ambiente, ésto es, no debe haber remanencia o resistencia con un cambio rápido de estado magnético (Fuentes y Tartaj, 2006)

Actualmente, por ejemplo, se usan adsorbentes poliméricos que contienen nanoimanes superparamagnéticos para la separación de biocompuestos (Ramanujan *et al.*, 2007) y han demostrado ser un camino rentable para remover elementos transuránicos de corrientes residuales nucleares (Nuñez, L. y Kaminski).

Para explotar acabadamente las características de los materiales que contienen nanoimanes superparamagnéticos, es necesario desarrollar nuevas estrategias que

permitan agregar nuevas propiedades a los materiales magnéticos resultantes.

En particular los materiales compuestos (compósitos) de gran superficie específica y porosidad accesible, serían un avance significativo para mejorar o extender la aplicabilidad la técnica de separación magnética en diferentes campos tales como biomedicina, catálisis, tratamiento de aguas residuales, etc. (Ao *et al.*, 2008; Gong *et al.*, 2009; Ramanujan *et al.*, 2007; Yang, M. *et al.*, 2010; Zhang G. *et al.*, 2007).

En este trabajo se comparan los materiales compuestos obtenidos a partir de 3 protocolos de síntesis para generar la fase magnética que se enclava a la matriz porosa.

Se hace una evaluación comparativa de los materiales obtenidos a partir de la caracterización textural de la estructura porosa, identificación de la fase no carbonosa y el comportamiento de los adsorbentes frente a campos magnéticos variables (ciclo de histéresis) y campos magnéticos fijos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Síntesis del Carbón activado magnético

Síntesis de carbón activado. Proceso de pirolisis y activación.

El carbón activado (CA) se sintetizó en el laboratorio del CIPIMM a partir de cascarón de coco. En este caso, la materia prima se carbonizó en una retorta de acero inoxidable de 5L de capacidad, calefaccionada eléctricamente. El material de partida se llevó, en ausencia de aire, desde temperatura ambiente hasta la temperatura final de carbonización (773K), manteniéndose a esta temperatura por 2 horas.

El material carbonizado se colocó, en un horno de botella rotatorio, de acero inoxidable (activación dinámica), calentado eléctricamente y se activó con vapor de agua. Básicamente, el reactor se calienta desde temperatura ambiente hasta la temperatura de activación (1173K), en atmósfera de nitrógeno.

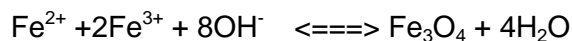
En ese momento, la corriente de nitrógeno se reemplaza por un flujo de vapor (2,5g de vapor de agua por gramo de material carbonizado y por hora). Se adoptó un tiempo de activación de 105 minutos. Cuando finaliza el proceso de activación, se enfría el sistema desde 1173 K hasta temperatura ambiente, en corriente de nitrógeno. El CA obtenido se identificó como M0.

Introducción de la fase magnética.

Se ensayaron diferentes protocolos de síntesis de carbones activados magnéticos sobre el carbón activado, con el objeto de comparar la eficiencia de diferentes alternativas para introducir el material ferromagnético en la estructura porosa del adsorbente.

En el primer método de obtención de CAM, se pesa 5,54g de FeCl_3 y 2g de FeCl_2 . Se disuelven en 200mL de agua destilada. Al visualizar una disolución completa se agrega lentamente 25mL de NH_4OH al 28% y se lleva al reactor. En el mismo se dejan los reactivos para lograr una buena distribución y mezcla durante 5 minutos y con agitación mecánica, de forma tal que luego de alcanzado este tiempo se inyecta nitrógeno obteniendo así una atmósfera libre de O_2 . En este punto se cierra la válvula y se calienta a 330-340K durante una hora. Al finalizar el tiempo, se saca el recipiente, se filtra el precipitado y se lava un par de veces.

El precipitado formado es negro, el cual indica la presencia de magnetita en el vaso contenedor según la reacción siguiente:



La magnetita obtenida se filtra y se seca. Por otro lado se pesa la misma cantidad de carbón activado.

Se mezclan ambos contenidos y se agita mecánicamente durante una hora a temperatura ambiente. Por último se filtra y seca. El sólido compuesto obtenido a partir de este protocolo se identificó como M1.

El segundo procedimiento aplicado se basa en lograr partículas con características

magnéticas utilizando FeSO_4 y FeCl_3 como precursores y precipitando los óxidos de hierro sobre el soporte de carbón activado por medio de solución de NaOH.

Básicamente se disuelven 15,5g de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ en 100mL de agua destilada y 4,8g de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en 20mL de agua destilada, luego se mezclan ambas soluciones a 333K. Se agregan 4g de carbón activado a la solución que contiene las sales de hierro.

La mezcla se colocó en un baño termostático (333K) con agitación vigorosa durante 1h, agregando NaOH 5M de manera lenta hasta alcanzar un $\text{pH} \cong 11$. Se deja enfriar la solución y luego se la filtra (lavando si es necesario). El sólido se lleva a estufa (373K) para secarlo. La muestra de CAM obtenida por este procedimiento se identificó como M2.

En la tercer ruta de síntesis, se disuelven 25,28g de $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ en etanol y se impregna repetidamente por humedad incipiente 5g de CA (luego de cada carga se lleva la muestra impregnada a estufa para eliminar la humedad) hasta incorporar toda la solución férrica al sólido poroso. A la muestra impregnada seca se le agrega etilenglicol como agente reductor para provocar la reducción parcial del Fe^{3+} a Fe^{2+} . El sólido se deja en contacto con etilenglicol a 353K por 2 horas, luego se produce la descomposición térmica de la sal precursora en horno eléctrico, bajo atmósfera de nitrógeno a temperatura de 623K, por 2 horas y finalmente se enfría hasta temperatura ambiente bajo corriente de nitrógeno. La muestra de CAM obtenida por este procedimiento se titula como M3.

Caracterización del carbón activado magnético.

Adsorción de nitrógeno a 77K.

Los estudios de adsorción de nitrógeno permiten analizar los cambios en la estructura porosa de la matriz carbonosa debidos a la

entrada de la fase magnética. Se llevaron a cabo en un sorptómetro Micromeritic Gemini V, y las muestras son desgasadas a temperatura constante en un equipo Micromeritics FlowPrep 060, a la temperatura requerida durante un tiempo aproximado de 12 horas.

Difracción de rayos X

Estos estudios tienen por objeto establecer la presencia de estructuras cristalinas e identificación de fases en las muestras de material sólido. Se realizaron en un difractor de rayos X marca RIGAKU modelo D-MAX IIIC, con lámpara de cobre y filtro de níquel operado a 30 kV, 20 mA, velocidad de barrido de 2 °/min, con paso de lectura de 0,05° continuo.

Se llevaron a cabo sobre muestras de CA (M0), y los CAMs identificados como M1, M2 y M3.

Microscopía electrónica de barrido

Se utilizó un microscopio electrónico de barrido Jeol JSM-6460LV, equipado con detectores para electrones secundarios y reflejados, mediante EDS EDAX Genesis XM4-Sys 60, diseñada para la realización de espectroscopía de rayos X por dispersión de energía, equipada con un AMC EDAX modelo EDAM IV, detector de Si(Li) y ventana de Be super-ultra-delgada.

Ciclo de histéresis

Las propiedades magnéticas de las muestras se estudiaron en un magnetómetro de muestra vibrante marca Lakeshore, Modelo 7300.

Comportamiento ante un campo magnético externo fijo

Para verificar el comportamiento de un sólido poroso ante un campo magnético externo, se colocó en un vaso de precipitado el adsorbente suspendido en agua. En un costado del vaso se generó un campo magnético haciendo pasar una corriente continua de 1A por una bobina de Cu de 1000 espiras.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estructura porosa del sólido

Los resultados de las experiencias de adsorción de nitrógeno a 77K se muestran en la Figura 1 y se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades texturales de los adsorbentes

Adsorbente	BET(m ² /g)	Vol total de poros (cm ³ /g)	Volumen de microp. (cm ³ /g)	Volumen de mesop.(cm ³ /g)
M0	774	0,47	0,41	0,06
M1	433	0,42	0,19	0,23
M2	405	0,37	0,19	0,18
M3	332	0,34	0,21	0,13

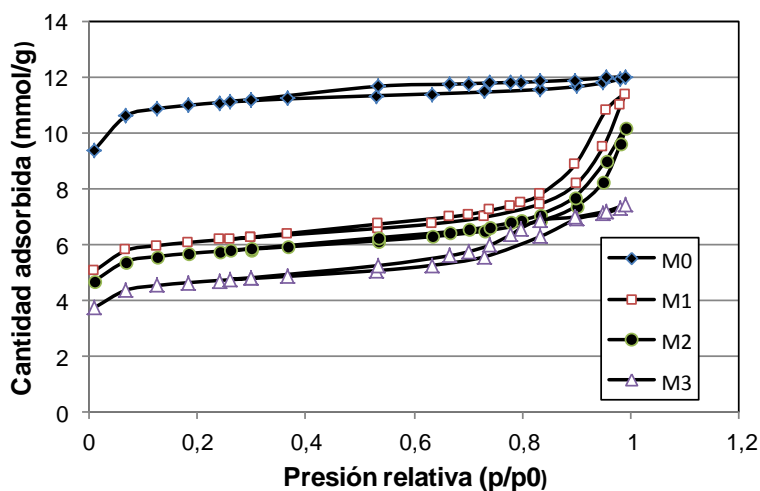


Figura 1. Isothermas de adsorción de nitrógeno a 77K

El carbón activado utilizado (M0) presenta una isoterma de adsorción típica de un sólido esencialmente microporoso, con escasa presencia de mesoporos. Sólo un porcentaje de aproximadamente el 10% de la cantidad de adsorbato que satura la muestra, condensa a presiones relativas superiores a 0,4 indicando baja población de mesoporos.

Se produjo una disminución importante en la superficie específica de los adsorbentes magnetizados (modelada por BET) comparada con la del adsorbente M0, debido a la entrada de la fase magnética al soporte poroso. La

posición de la rodilla de la isoterma de adsorción indica que la población de microporos ha disminuido en forma notable respecto de M0, probablemente porque las partículas magnéticas han obturado la entrada de los microporos.

Por otra parte aparece en la muestra magnetizada un lazo de histéresis y un marcado tramo ascendente en la región de presiones relativas mayores a 0,7 característicos de sólidos mesoporosos debido a la adsorción de nitrógeno en la estructura porosa de la magnetita. Esto se

observa en las gráficas de distribución de tamaño de poros, donde aparece una

población importante de mesoporos (Figura 2).

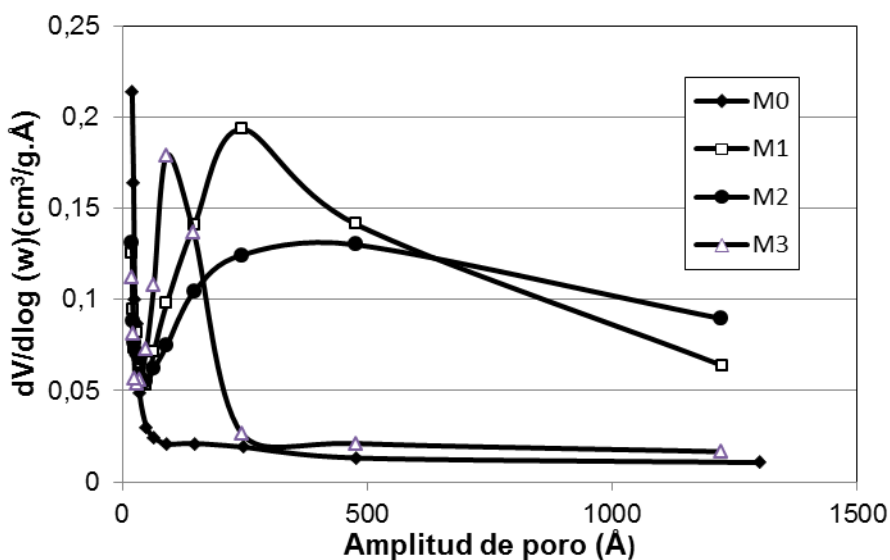


Figura 2. Distribución de tamaño de poros – BJH – rama adsorción

Estructura de la fase magnética.

Los difractogramas de rayos X se presentan en la Figura 3. La muestra M0 exhibe una fase

amorfa con unos pequeños picos que pueden ser debidas a impurezas puesto que no se corresponden con algunas de las variedades alotrópicas de carbono.

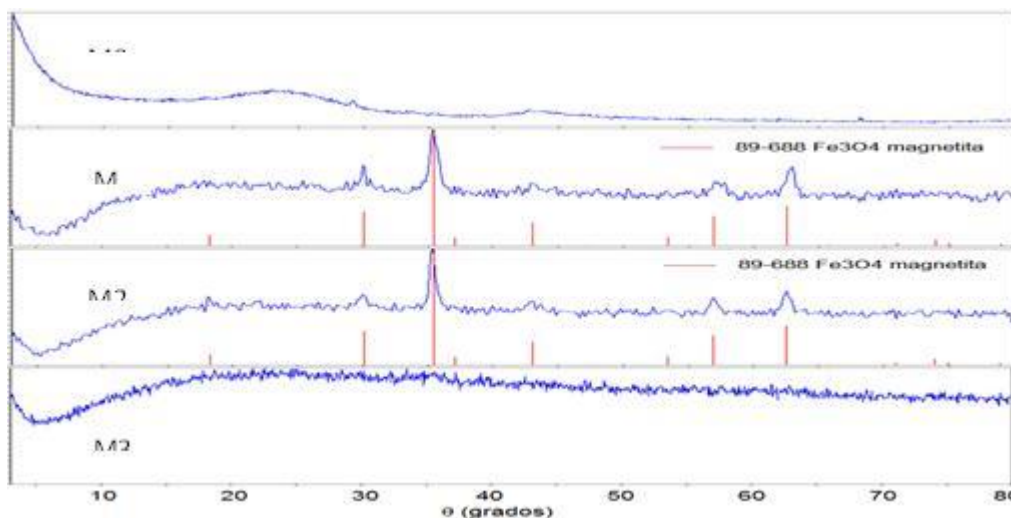


Figura 3. Patrones de difracción de rayos X

El difractograma de rayos X de la muestra M1, es característico de la presencia de hierro cuando la muestra se irradia con la radiación

K-alfa de cobre. No obstante puede identificarse la presencia de la fase cristalina

magnetita coincidente con el archivo JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards): 89-688.

La muestra M3, presenta características amorfas, sin embargo la fuerte fluorescencia es indicativo de la probable presencia de hierro como en las muestras M1 y M2, aunque esta vez sin estar ordenada lo suficiente para poder observar su difracción de rayos X.

Dispersión de la fase magnética

La Tabla 2 muestra los resultados del microanálisis de rayos X con sonda de

Los ensayos correspondientes a la muestra M2 indican que, básicamente, es idéntica a M1 con una leve mejor definición de los picos, correspondiente a magnetita. electrones al CA y los CAMs sintetizados por cada uno de los protocolos detallados. En el ensayo correspondiente a CA, hay un contenido de aproximadamente 94% de carbono y aparecen sólo vestigios de Fe. Mientras que los resultados para M1, M2 y M3 aparecen porcentajes variables entre 23 y 40% en peso de hierro, y entre 11 y 30% de oxígeno, compatibles con la existencia de la fase incorporada a la matriz carbonosa.

Tabla 2. Resultados del estudio de EDS

Elemento	M0 % peso	M1 % peso	M2 % peso	M3 % peso
C	93,53	59,78	26,29	57,62
O	5,74	11,84	30,45	17,99
Na	0,44	0,00	0,32	0,09
Mg	0,00	0,12	0,62	0,10
Si	0,00	0,16	0,64	0,27
S	0,00	0,26	0,00	0,17
Ca	0,00	0,32	0,80	0,41
Fe	0,29	27,51	40,87	23,36

Comportamiento frente a un campo magnético externo variable.

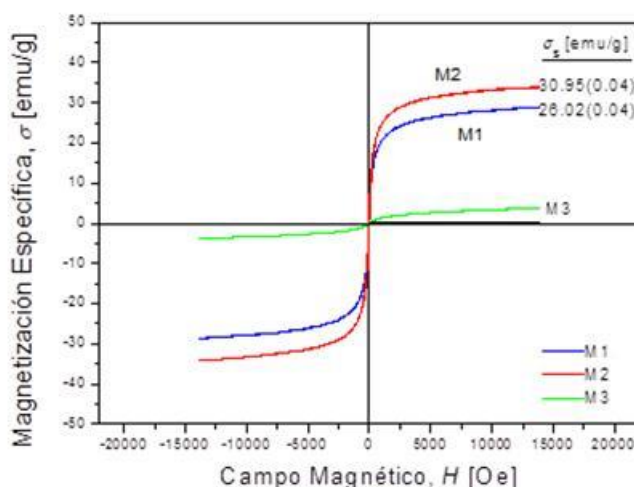


Figura 4. Curvas de magnetización (ciclo de histéresis)

La Figura 4 exhibe las curvas de magnetización frente a un campo magnético variable. La muestra M0 tiene señal muy débil, del orden del límite de detección del equipo. El ciclo de histéresis no se cierra posiblemente debido a fenómenos de viscosidad magnética. Debido a esto no se incluye en la figura mencionada.

En el ensayo sobre M1, las mediciones de magnetización en función de campo magnético indican que la muestra tiene una magnetización específica de saturación de $26,02 (\pm 0,04)$ emu/g y una magnetización de remanencia de $1,1 (\pm 0,1)$ emu/g. La coercitividad de la muestra es de 15 Oe (del orden de la sensibilidad del equipo), con lo cual se puede afirmar que el material no es coercitivo. El comportamiento magnético que gobierna es el superparamagnetismo.

En el caso de la muestra M2, el material tiene una magnetización específica de saturación de $30,95 (\pm 0,04)$ emu/g y una magnetización remanente de $2,18 (\pm 0,01)$ emu/g. La coercitividad del material es de 42 Oe (del

orden de la sensibilidad del equipo), con lo se puede concluir que el material no es coercitivo. Al igual que la muestra M1 el comportamiento magnético que gobierna es el superparamagnetismo.

De las mediciones de magnetización en función de campo magnético para la muestra M3, se puede decir que el comportamiento magnético que gobierna es el paramagnetismo ya que no satura. El material es magnéticamente blando (no tiene coercitividad ni remanencia).

Comportamiento ante un campo magnético externo fijo.

Las muestras M1 y M2 muestran en forma nítida el arrastre de las partículas de CAM por el campo magnético (Figura 5). Este comportamiento no es tan notable en M3, probablemente porque, de acuerdo a los resultados de difracción de rayos X el hierro no se encuentra en una fase cristalina.

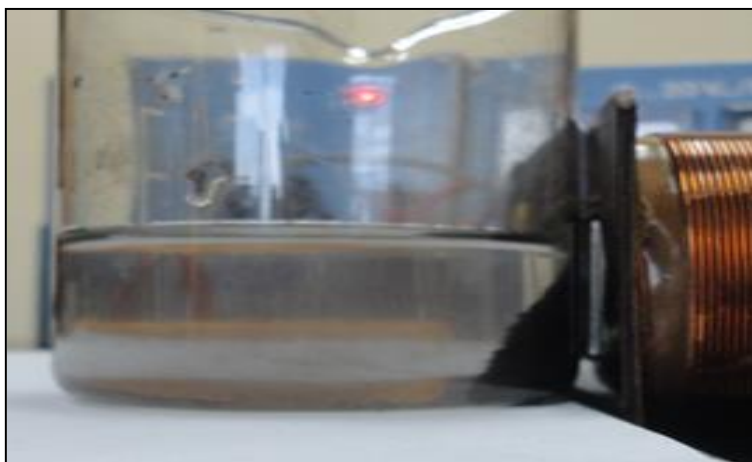


Figura 5. CAM en presencia de un electroimán

CONCLUSIONES

1. Las distintas rutas de síntesis incorporan al hierro de forma diferente en la matriz carbonosa.
2. Cuando la fase magnética se genera a partir de FeCl_2 y FeCl_3 y cuando se precipita a partir de FeSO_4 y FeCl_3 , se obtiene una fase que tiene un comportamiento superparamagnético, con el hierro en la forma de magnetita.
3. Los carbones activados magnéticos obtenidos por estas dos rutas de síntesis son fuertemente arrastrados por un campo magnético externo.
4. La tercera ruta de síntesis, incorpora al hierro en una fase no ordenada de comportamiento paramagnético. Un campo magnético externo produce un arrastre menor de las partículas sólidas.
5. La superficie específica de los CAMs disminuye aproximadamente un 50% respecto al adsorbente inicial, básicamente porque las partículas magnéticas obturan la entrada en los microporos.

BIBLIOGRAFÍA

- Ai, L.; Huang, H.; Chen, Z.; Wei, X. y Jiang, J. 2010. Activated carbon/ CoFe_2O_4 composites: Facile synthesis, magnetic performance and their potential application for the removal of malachite green from water. *Chemical Engineering Journal*. 156: 243–249.
- Alexandre-Franco, M.; Fernández-González, C.; Alfaro-Domínguez, M.; Gómez-Serrano, V. 2011. Adsorption of cadmium on carbonaceous adsorbents developed from used tire rubber. *Journal of Environmental Management*. 92(9): 2193-2200.
- Amaya, A.; Medero, N.; Tancredi, N.; Silva, H. y Deiana, C. 2007. Activated carbon briquettes from bio-mass materials. *Bioresource Technology*. 98(8): 1635-1641.
- Ao, Y.; Xu J.; Fu, D. y Yuan C. 2008. A simple route for the preparation of anatase titania-coated magnetic porous carbons with enhanced photocatalytic activity. *Carbon*. 46: 596–603.
- Baçauoui, A.; Yaacoubi, A.; Dahbi, A.; Bennouna, C.; Phan-Tan- Luu, R.; Maldonado-Hodarc, F. J.; Rivera-Utrillac, J. y Moreno-Castilla, C. 2001. Optimization of conditions for the preparation of activated carbons from olive-waste cakes. *Carbon*. 39: 425–432.
- Castro, C.S.; Guerreiro, M.C.; Goncalves M.; Oliveira, L.C.A. y Anastácio, A.S. 2009. Activated carbon/iron oxide composites for the removal of atrazine from aqueous medium *Journal of Hazardous Materials*. 164: 609–614.
- Deiana, C.; Granados, D.; Petkovic, L.; Sardella, F. y Silva, H. 2004. Use of grape must as a binder to obtain activated carbon briquettes. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 21(4): 585-591.
- Fuertes, A.B. y Tartaj, P. 2006. A Facile Route for the Preparation of Superparamagnetic Porous Carbons. *Chemistry of Materials*. 18: 1675-1679.
- Gholamvaisia D.; Azizian, S. y Cheraghia, M. 2014. Preparation of magnetic-activated carbon nanocomposite and its application for dye removal from aqueous solution. *Journal of Dispersion Science and Technology*. Volume 35, Issue 9: 1264-1269.
- Gong, G.; Xie, Q.; Zheng, Y.; Ye S. y Chen, Y. 2009. Regulation of pore size distribution in coal-based activated carbon. *New Carbon Materials*. 24, Issue 2: 141-147.
- Gorria, P.; Sevilla, M.; Blanco, J. A. y Fuertes, A. B. 2006. Synthesis of magnetically separable adsorbents through the incorporation of protected nickel nanoparticles in an activated carbon. *Carbon*. 44: 1954–1957.
- Gutiérrez-Segura E.; Solache-Ríos M.; Colín-Cruz A.; Fall C. 2012. Adsorption of cadmium by Na and Fe modified zeolitic tuffs and carbonaceous material from pyrolyzed sewage sludge. *Journal of Environmental Management*. 97: 6-12.
- Kahani, S. A.; Hamadani, M. y Vandadi, O. 2007. Deposition of magnetite nanoparticles in activated carbons and preparation of magnetic activated carbons. *First Sharjah International Conference* edited by Y. I. Salamin, N. M. Hamdan, H. Al-Awadhi, N. M. Jisrawi, and N. Tabet, 183-188.
- Kakavandi, B.; Jafari, J.A.; Kalantary, R. R.; Nasser, S.; Ameri, A. y Esrafil, A. (2013). Synthesis and properties of Fe_3O_4 -activated carbon magnetic nanoparticles for removal of aniline from aqueous solution: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 10(1): 19-27.
- Mohan, D.; Sarswat, A.; Singh, V.K.; Alexandre-Franco, M. y Pittman, C.U. 2011. Development of magnetic activated carbon from almond

- shells for trinitrophenol removal from water. *Chemical Engineering Journal*. 172: 1111–1125.
- Nuñez, L. y Kaminski, M. D. 1999. Transuranic separation using organophosphorus extractants adsorbed onto superparamagnetic carriers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. Volume 194, Issues 1–3: 102–107.
- Ramanujan, R.V.; Purushotham, S. y Chia, M.H. 2007. Processing and characterization of activated carbon coated magnetic particles for biomedical applications. *Materials Science and Engineering, C* 27: 659–664.
- Schwickardi, M.; Olejnik, S.; Salabas, E.L.; Schmidt, W. y Schüth F. 2006. Scalable synthesis of activated carbon with superparamagnetic properties. *Chemical Communications*, 3987–3989.
- Wan, J.; Deng, H.; Shi, J.; Zhou, L. y Su, T. 2014. Synthesized Magnetic Manganese Ferrite Nanoparticles on Activated Carbon for Sulfamethoxazole Removal. *Clean – Soil, Air, Water*. Volume 42, Issue 9: 1199–1207p.
- Yang, M.; Xie Q.; Zhang, H. J.; Liu, J.; Wang, Y.; Zhang, X. y Zhang, Q. 2010. Effects of coal rank, Fe_3O_4 amounts and activation temperature on the preparation and characteristics of magnetic activated carbon. *Mining Science and Technology*, 20: 0872–0876.
- Yang, N.; Zhu, S.; Zhang, D. y Xu, S. 2008. Synthesis and properties of magnetic Fe_3O_4 -activated carbon nanocomposite particles for dye removal. *Materials Letters*, 62: 645–647.
- Zhang G.; Qu, J.; Liu, H.; Cooper, A.T. y Wu, R. 2007. CuFe_2O_4 /activated carbon composite: A novel magnetic adsorbent for the removal of acid orange II and catalytic regeneration. *Chemosphere*, 68: 1058–1066.
- Zhang, J.; Qiang X.; Liu, J.; Yang, M. y Yao X. 2011. Role of $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ in the preparation of a magnetic coal- based activated carbon. *Mining Science and Technology (China)*, 21(4): 599–603.