

Propiedades texturales a partir de isoterma de N₂ de carbón activado y sílice mesoestructurada tipo SBA-15 magnetizados para explorar su capacidad de adsorción según modelos para el fenol

Textural properties from N₂ isotherms of activated carbon and mesostructured silica type SBA-15 magnetized to explore its adsorption capacity according to phenol models

J.C. Moreno-Piraján¹, J.P. Rodríguez-Estupiñán¹, L. Giraldo², Paula M. Cantor-Campos³

¹Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

²Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

³Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (U.D.C.A.), Bogotá, Colombia

*Corresponding author: jumoreno@uniandes.edu.co

Abstract

The solids, granular activated carbon and SBA-15 mesostructured silica was subjected to a modification process whereby Fe₃O₄ magnetite nanoparticles were deposited on the surface of the starting solids, using the nanoparticle coprecipitation method in the preparation of composites. The solids prepared were characterized by nitrogen adsorption isotherms at -196 ° C. These materials were tested to assess their adsorption capacity in phenol at different concentrations, performing the respective isotherms by adjusting the experimental results to the Langmuir, Freundlich and Redlich-Peterson models. Which evidences that the modification of activated carbon and silica with magnetite by the coprecipitation method blocks the porosity of solids and an intraparticle porosity is generated.

Resumen

Los sólidos, carbón activado granular y sílice mesoestructurada SBA-15 fueron sometidos a un proceso de modificación mediante el cual se depositaron nanopartículas de magnetita Fe₃O₄ en la superficie de los sólidos de partida; utilizando el método de coprecipitación de las nanopartículas en la preparación de composites. Los sólidos preparados fueron caracterizados mediante isotermas de adsorción de nitrógeno a -196°C. Dichos materiales fueron ensayados para evaluar su capacidad de adsorción en fenol a distintas concentraciones, realizando las respectivas isotermas ajustando los resultados experimentales a los modelos de Langmuir, Freundlich y Redlich-Peterson. Lo cual evidencia que la modificación del carbón activado y la sílice con magnetita por el método de coprecipitación bloquea la porosidad de los sólidos y se genera una porosidad intraparticular.

1. Introducción

La contaminación del agua por efluentes provenientes de distintas industrias es una problemática mundial. Existen diversos compuestos que pueden llegar a encontrarse en cuerpos de aguas a donde llegan

los desechos de las industrias, entre los cuales se encuentran: compuestos orgánicos e inorgánicos, entre ellos el fenol, así como otros subproductos no deseados. El fenol es un compuesto empleado como materia prima de un gran número de procesos industriales, presente en el medio ambiente, a causa de las descargas a cuerpos de agua de efluentes industriales de la producción de medicamentos, textiles, tintes, pesticidas y papel [1]. El fenol y sus compuestos derivados son altamente tóxicos, debido a que poseen efectos cancerígenos, por lo general emiten olores y sabores desagradables e irritantes, en concentraciones de 5µg/L, son venenosos para la vida acuática, vegetal y en humanos. La ingestión de fenoles en concentraciones entre 10 a 240 mg/L por largo tiempo causa irritación bucal, diarreas, excreción de orina oscura y problemas en la visión; por tal razón han sido enlistados en la Directiva de la Comunidad Europea (ECD) y en la agencia de Protección Ambiental Americana (EPA) [1].

Numerosos esfuerzos han sido realizados para eliminar los compuestos fenólicos en aguas de desecho, como por ejemplo la extracción por solventes, sedimentación, precipitación, ósmosis, ultracentrifugación, microfiltración, entre otras, obteniendo resultados satisfactorios; desafortunadamente dichos métodos no son efectivos a bajas concentraciones de fenoles, por ejemplo, la precipitación química es ineficiente en concentraciones de 100 mg/L, produciendo lodo, cuyo tratamiento es difícil y costoso. También se encuentran las resinas de intercambio, junto con la tecnología de membranas. Sin embargo, estos procesos suelen ser caros y más cuando se trata de grandes volúmenes y aguas de desechos con contaminantes inorgánicos o corrosivos [1].

Los procesos de adsorción en fase líquida han demostrado ser altamente eficientes para la eliminación de colorantes, olores, contaminantes orgánicos e inorgánicos de procesos industriales o efluentes residuales [2]. Uno de los fenómenos fisicoquímicos más importantes en la industria química, el cual se caracteriza por ser un proceso donde los átomos, iones, moléculas de gases,

líquidos o sólidos disueltos son retenidos en una superficie porosa [3]. Por otro lado, un sólido poroso, es un sólido con cavidades, canales o intersticios, los cuales se caracterizan por ser profundos en vez de anchos [4]. La IUPAC ha clasificado los sólidos porosos según las dimensiones del poro. Teniendo

en cuenta que los materiales con un diámetro aproximado de 2 nm son microporosos, aquellos entre 2 y 50 nm, mesoporosos y los poros mayores a 50 nm, macroporosos [5]. La porosidad puede ser interconectada abierta, cerrada de paso abierto y de paso cerrado Figura 1.

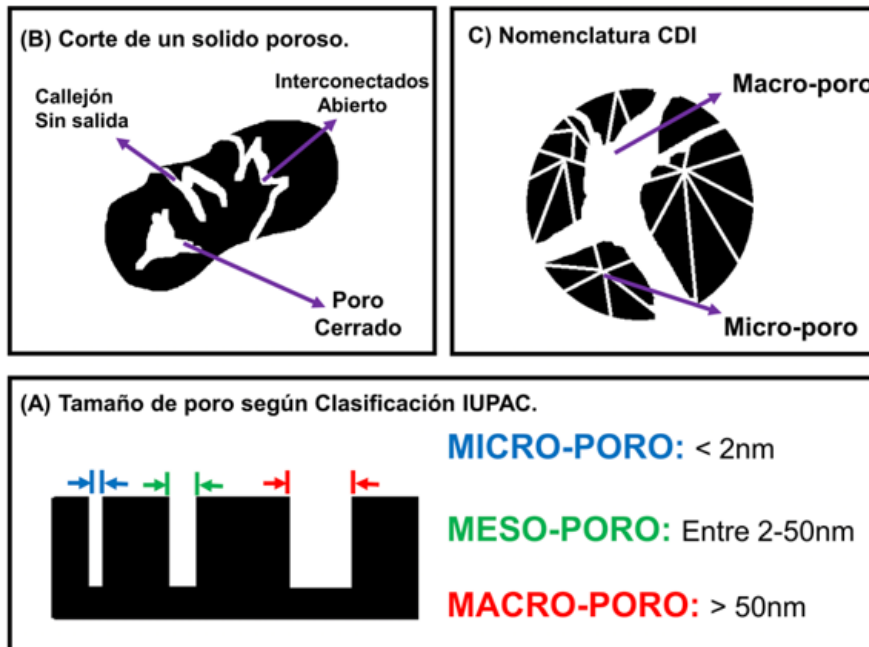


Figura 1. Nomenclatura de los poros de acuerdo a la IUPAC. Adaptada de la referencia [6]

2. Marco Teórico

Carbón Activado

Este material no está definido únicamente por su estructura porosa sino también por su naturaleza química. Los átomos de carbono con valencia insaturada que le constituyen, cuentan con grupos funcionales principalmente de oxígeno e hidrógeno y con componentes inorgánicos procedentes de la ceniza [7], quienes pueden determinar el tipo de adsorción que se lleva a cabo sobre la superficie del sólido, por adsorción física o química dependiendo del contenido de heteroátomos, pues estos determinan en los carbones activados la carga de superficie, la hidrofobicidad y la densidad electrónica en las capas grafénicas; estos grupos en la superficie de los carbones activados hacen que las partículas en solución presenten una carga influyente en los procesos de adsorción [8], la carga superficial depende del pH del medio y de las características superficiales del carbón, si la carga es negativa se debe a la disociación de grupos de carácter ácido como carboxílicos y fenólicos [9].

Sílice Mesoestructurada SBA-15

La SBA-15 hace parte de los grupos de nuevos materiales que han atraído recientemente considerable atención debido a sus prometedoras aplicaciones en catálisis de forma selectiva y separaciones que involucran grandes moléculas en comparación con otros materiales mesoporosos

regulares; por ejemplo, el método de síntesis puede modificarse para obtener poros de 30nm, considerablemente grandes, dando como resultado una estructura más estable debido a que las paredes de poros son más gruesas [10]. Para que un sólido poroso sea apto para el proceso de adsorción a escala industrial, debe cumplir con ciertas propiedades de estabilidad fisicoquímica y resistencia mecánica, puesto que después del proceso de adsorción y una vez el sólido cumple su vida útil debe ser fácilmente separado de la corriente líquida. Surge entonces la idea de incorporar una fase magnética a la matriz porosa del adsorbente y así favorecer la separación compitiendo en ventaja con respecto a la filtración [11].

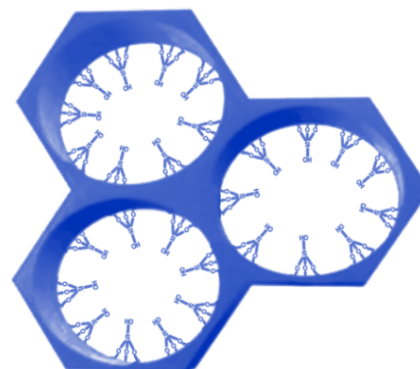


Figura 2. Sílice mesoestructurada SBA-15 en forma de micelas. Adaptada de [10]

Magnetita

Las propiedades magnéticas de los óxidos de hierro se pueden utilizar en nano-catálisis, nanoelectrónica, aplicaciones biomédicas en la administración dirigida de medicamentos o resonancia magnética, también se usa en el tratamiento de eliminación de contaminantes en el agua [12], por lo que se preparan carbones activados magnéticos, dispersando magnetita sobre la superficie de un carbón activado u otro sólido poroso (Figura 3); son materiales eficientes para captar moléculas de interés, presentes en soluciones diluidas. Usando un electroimán, se logra remover rápidamente de la corriente líquida, compitiendo con ventaja respecto a la filtración [11].

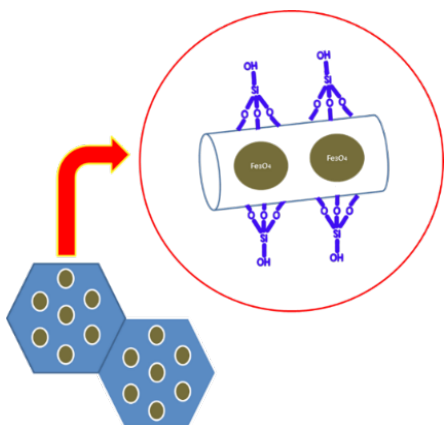


Figura 3. Magnetita adsorbida en SBA-15. Adaptada de [13, 8]

Fenol

El fenol dispone en su estructura un anillo de benceno y un grupo hidroxilo. A causa del anillo aromático, el fenol tiene la capacidad de estabilizarse, debido a que permite perder con facilidad el hidrógeno de su grupo hidroxilo lo que hace que se comporte como un ácido débil. Adicional a ello el fenol puede sufrir de numerosas reacciones de sustitución electrofílica, como la halogenación y sulfuración. También tiende a reaccionar con compuestos carbonílicos tanto en medio ácido como básico.

3. Metodología

Carbón Activado (CAG)

Se utilizó un carbón activado comercial el cual fue modificado, el carbón fue preparado a partir de cáscara de coco mediante activación física CAG (*Granular Activated Carbon*). La ficha técnica de este material se presenta en la Tabla 1.

Precursor	Lignocelulósico, Cáscara de coco
Presentación	Granulado
Activación	Física
pH	5-7
Número de Iodo	850 – 950 mg I/g Carbón
Densidad	0,45-0,55g/cm ³

Tabla 1. Ficha técnica CAG. Tomada de [14]

Sílice Mesoestructurada Tipo SBA-15

Se sintetizó SBA-15 con el protocolo de Zhao [15] el cual constó de un desarrollo por método sol-gel, empleando un copolímero poli (óxido de etileno)-poli (óxido de propileno)-poli (óxido de etileno), conocido comercialmente como Pluronic P123 con peso molecular de 5800 g/mol.

Proceso de Magnetización de Sólidos Porosos

A partir de los dos precursores preparados se sigue el siguiente procedimiento:

Se pesó 4,8623g de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ en 50mL de agua destilada, aparte se pesó 2,5440 g de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en 100 mL, ambas se agitaron a 300 rpm por 10 minutos, seguidamente se mezcló en un Erlenmeyer de 250mL y se colocó agitar a 300 rpm con agitador magnético a 60°C por 10 minutos, una vez se observó la solución homogénea, se adicionó 2,2085 g de carbón activado granular (CAG). Luego se agitó por 1h, se adicionó NH_4OH concentrado de manera lenta hasta alcanzar un pH de 11. Después se ubicó a reposar la solución para filtrarla al vacío donde se obtuvo un sólido negro que se llevó a secado en estufa con una temperatura de 50°C.

Para la magnetización de SBA-15, se pesó 2,0438 g de SBA-15 en 500 mL de agua desionizada y se llevó a un baño de ultrasonido por 60 minutos, hasta obtener una solución dispersa. Luego se preparó una solución de 3,0140g de cloruro férrico hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y 2,714 g de sulfato ferroso heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) en 500 mL de agua destilada que se mezcló con la solución de SBA-15. Se llevó nuevamente a un baño de ultrasonido por 60 minutos. Posteriormente, se adicionaron 30 mL de hidróxido de amonio (NH_4OH) al 25 % mezclando muy lentamente a 100 rpm, seguidamente se mezcló por 4 h burbujeándole nitrógeno. Todo el proceso, se mantuvo a 80 °C. Una vez la reacción culminó, el nanocompuesto SBA-15-M se filtró al vacío y se lavó repetidamente con cantidades suficientes de acetona. Finalmente, las nanopartículas SBA-15-M se secaron al vacío a 40 °C durante 4 h.

4. Resultados y Análisis de resultados

Propiedades Texturales a partir de Isotermas de N_2

Los parámetros de texturales de los sólidos de partida y modificados pueden estudiarse a partir de los datos experimentales de adsorción de N_2 a -196 ° C, como se muestra en las Figura 4. (a) y (b), la isoterma de adsorción/desorción de N_2 de la muestra CAG tienen esencialmente una forma del tipo I(a), característica de los sólidos microporosos según la clasificación IUPAC, la isoterma es cóncava con respecto al eje de presión relativa y la capacidad máxima se aproxima a un valor límite dado por el volumen de los microporos, en cuanto a la muestra CAG-M, la isoterma se puede clasificar como tipo IV(a), característica de los sólidos mesoporosos también según la clasificación IUPAC, la isoterma tiene una etapa inicial relacionada

con la microporosidad disponible en los carbones activados, que no está obstruida por el anclaje de las nanopartículas de magnetita, luego se produce una adsorción monocapa-multicapa en las estructuras mesoporosas, una tercera etapa estuvo marcada por el cambio en la tendencia de adsorción de nitrógeno, este cambio está relacionado con la condensación capilar del adsorbato debido a las dimensiones de los mesoporosos, también se debe identificar un ciclo

de histéresis, para la muestra CAG-M se clasifica claramente como H1 según la clasificación IUPAC, esta histéresis está relacionada con la presencia de un rango estrecho de mesoporos uniformes con un mínimo de efectos de red [16], este cambio en el comportamiento de las isothermas es producido por el bloqueo de la porosidad dada por la presencia de nanopartículas de magnetita [17].

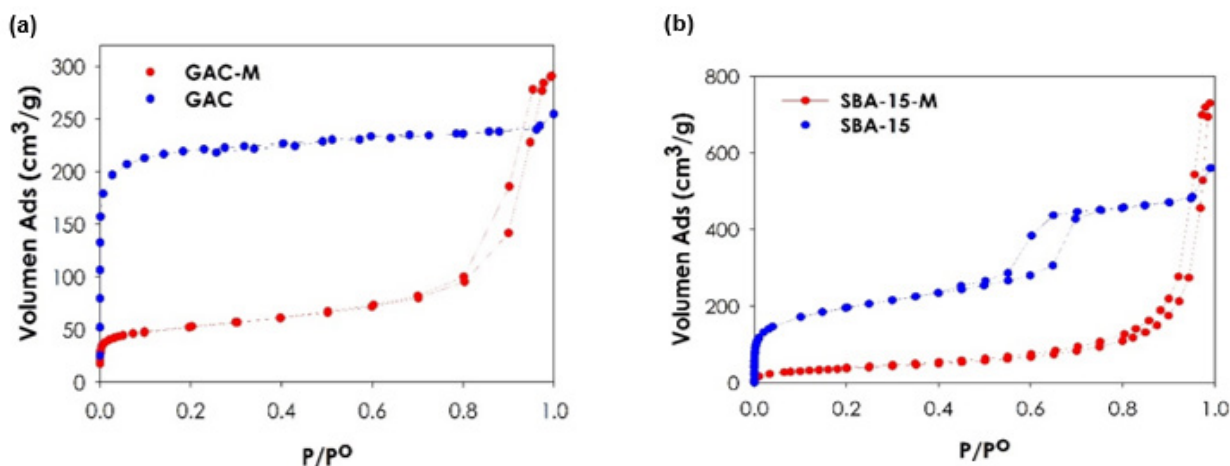


Figura 4. Isothermas de adsorción-desorción de N_2 a $-196^\circ C$ de (a) Carbón activado de partida y modificado, CAG y CAG-M, respectivamente, y (b) Sílice mesoestructurada de partida y modificada, SBA-15 y SBA-15-M, respectivamente.

En cuanto a las isoterma de adsorción de la SBA-15 puede ser clasificada dentro del sistema IUPAC como tipo IV(a), este tipo de isoterma es característica de sólidos mesoporosos, en la cual se observa una etapa inicial relacionada con adsorción en monocapa-multicapa en las paredes de los mesoporos, una segunda etapa relacionada con la condensación capilar del adsorbato debido a las dimensiones de los mesoporosos. Este proceso se presenta cuando un gas se condensa en una fase líquida dentro de un poro a una presión menor que la presión de saturación del líquido, la condensación capilar se acompaña de un bucle de histéresis tipo H1 [18, 19]. Una tercera etapa característica de las isothermas de tipo IV es un equilibrio de saturación final de longitud variable.

Como se mencionó anteriormente, el sistema poroso de las sílices mesoestructuradas tipo SBA-15, está compuesto por un arreglo 2D-hexagonal de poros cilíndricos rodeados por paredes de sílice amorfa, en donde se presenta un sistema de poros secundario

llamados intra-pared. Estos últimos conectan los mesoporos principales, formando así una red de poros 3D. Los poros intra-pared presentan una amplia distribución de tamaño entre el rango de los microporos y los mesoporos [20].

Los resultados experimentales se analizaron en diferentes rangos de presión relativa, utilizando el método BET para el cálculo de áreas de superficie aparente (el rango P/P^0 se determinó utilizando el método propuesto por Rouquerol et al.). El análisis de microporosidad se realiza mediante el modelo Dubinin-Astakhov (en $P/P^0 < 0.1$), el efecto de diferentes geometrías de poros y el efecto de rugosidad/heterogeneidad y homogeneidad de la superficie se estudió mediante modelos de teoría funcional de densidad en P/P^0 entre 10^{-6} y 1, utilizando el software AsiQWin. Para los sólidos mesoporosos se utiliza el modelo BJH, para el análisis de la mesoporosidad y la distribución del tamaño de poro. Las Tablas 2 a 4 resumen todos los parámetros de textura evaluados.

Tabla 2. Propiedades texturales de los carbones activados por el modelo B.E.T. y D.A. para CAG y CAG-M.

Muestra	BET		DA ($P/P^0 < 0.1$)				QSDFT ($P/P^0 10^{-5}-1$)	
	S_{BET} [$m^2 \cdot g^{-1}$]	C	V_{mic} [$cm^3 \cdot g^{-1}$]	E_o [$kJ \cdot mol^{-1}$]	N	Ancho de Poro [nm]	V_P [$cm^3 \cdot g^{-1}$]	Ancho de Poro [nm]
CAG	849	117	0,351	7,638	1,80	1,422	0,344	0.785
CAG-M	192	388	0,068	6,845	2,20	1,480	0,428	1,182

Tabla 3. Parámetros texturales determinados por el modelo de B.E.T. y D.A, para los sílices SBA-15, y SBA-15-M.

Muestra	BET		DA (P/P ⁰ < 0.1)			NLDFT (P/P ⁰ 10 ⁻⁵ -1)		
	S _{BET} [m ² .g ⁻¹]	C	V _{mic} [cm ³ .g ⁻¹]	E _o [kJ.mol ⁻¹]	n	Ancho de Poro [nm]	V _P [cm ³ .g ⁻¹]	Ancho de Poro [nm]
SBA-15	701	206	0,245	5,344	2,00	1,600	0,820	6,554
SBA-15-M	136	55,8	0,061	3,216	1,60	1,880	1,007	32,65

El área de superficie específica BET para las muestras magnéticas modificadas era de 136 a 192 m²/g, es decir que el parámetro S_{BET} disminuyó entre 80,6 a 77.4%, para las muestras SBA-15-M y CAG-M,

respectivamente. Esto sugiere que la modificación del carbón activado y la sílice con magnetita por el método de coprecipitación disminuye el área superficial específica de los materiales.

Tabla 4. Volúmenes de Poro y ancho medio de poro de la SBA-15 y su modificación, evaluados por el modelo de B.J.H., para la rama de adsorción y desorción.

Muestra	BJH Rama de Adsorción		BJH Rama de Desorción	
	Vol. Poro / cm ³ .g ⁻¹	Ancho de Poro/ Nm	Vol. Poro/ cm ³ .g ⁻¹	Ancho de Poro/ nm
SBA-15	0,684	6,507	0,747	4,921
SBA-15-M	1,132	7,778	1,143	35,66

El análisis del proceso de adsorción en sólidos mesoporosos está estrechamente relacionado con el concepto de condensación capilar. La condensación capilar es un proceso físico que ocurre en la adsorción en poros que tienen un tamaño entre 2 y 50 nm. Es la fase final del proceso de adsorción y permite determinar la distribución del tamaño de los poros en los sólidos mesoporosos, al relacionar la presión en el equilibrio de vapor con el radio de curvatura del menisco, la tensión superficial y el volumen molar, conocido como el modelo BJH, en la Tabla 4. , se puede observar que los volúmenes de poro total aumenta cuando se incluye la magnetita, esto se relaciona con la generación de porosidad intraparticular entre la magnética alojada en la porosidad y área externa de los sólidos porosos.

Modelos de isoterma Langmuir, Freundlich y Redlich-Peterson para la adsorción de Fenol

Mediante las curvas de adsorción de compuestos fenólicos se determinó la capacidad de adsorción de CAG, CAG-M, SBA-15 y SBA-15M para las soluciones en diferentes concentraciones para Fenol. En la Figura 5 se presenta la curva de calibración obtenida para la solución de fenol, donde se empleó la ecuación de tendencia lineal para calcular la concentración real de fenol en soluciones acuosas a distintas concentraciones, antes y después del proceso de adsorción.

A partir de los datos experimentales se obtuvo la isoterma de adsorción calculando Q_e (Ecuación 1), que es la cantidad de adsorbato adsorbido en (mg/g), C₀ es la concentración inicial de la solución (mg/L), C_e es la concentración en el equilibrio de la fase líquida (mg/L), m el peso del adsorbente en (g) y V es el volumen de la solución [21]:

$$Q_e = \frac{(C_0 - C_e)}{m} * V$$

Ecuación 1

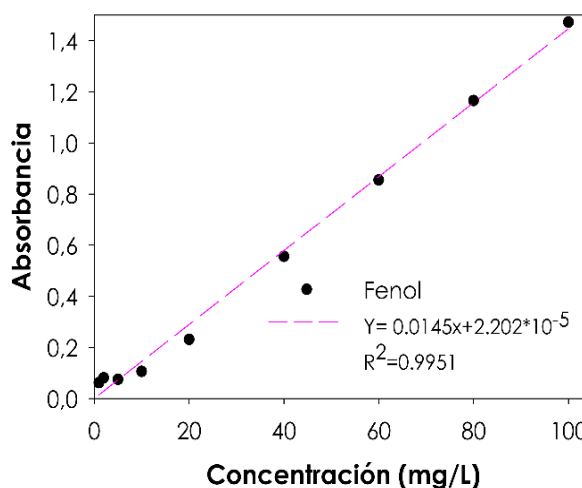


Figura 5. Curva de calibración obtenida experimentalmente por soluciones de Fenol de 0 a 100 mg/L espectrofotometría UV-Visible.

Con el fin de optimizar la caracterización de los sistemas de adsorción en estudio, se utilizaron los modelos de Langmuir, Freundlich y Redlich-Peterson para describir la naturaleza del equilibrio de adsorción. En las Tabla 5. se encuentran registrados los parámetros obtenidos de los modelos con respecto a la adsorción de fenol.

Modelos de Dos Parámetros de Ajuste

Muestra	Modelo de Langmuir			Modelo de Freundlich		
	Q ₀	K _L	R ²	K _F	n	R ²
CAG	61,8	0,485	0,840	23,5	2,63	0,840
CAG-M	75,7	0,140	0,926	20,5	3,12	0,924
SBA-15	1,56	0,049	0,588	0,314	3,25	0,545
SBA-15-M	8,21	0,069	0,967	0,844	1,89	0,924

Modelos de Tres Parámetros de ajuste

Muestra	Modelo Redlich-Peterson			
	K _{RP}	a _{RP}	B	R ²
CAG	4,40	-0,512	2,2*10 ⁻⁵	0,731
CAG-M	6,30	0,017	1,42	0,922
SBA-15	0,049	2,41*10 ⁻³	2,07	0,691
SBA-15-M	0,339	3,43*10 ⁻³	2,20	0,992

Tabla 5. Resumen de ajuste a modelos de dos y tres parámetros para los sistemas de adsorción de fenol.

En las Figuras (6 – 7) se presentan las isotermas de adsorción para fenol de la serie de sólidos de carbón activado, carbón activado magnetizado y sílice

mesoestructurada SBA-15 y magnetizada ajustados a los modelos anteriormente mencionados.

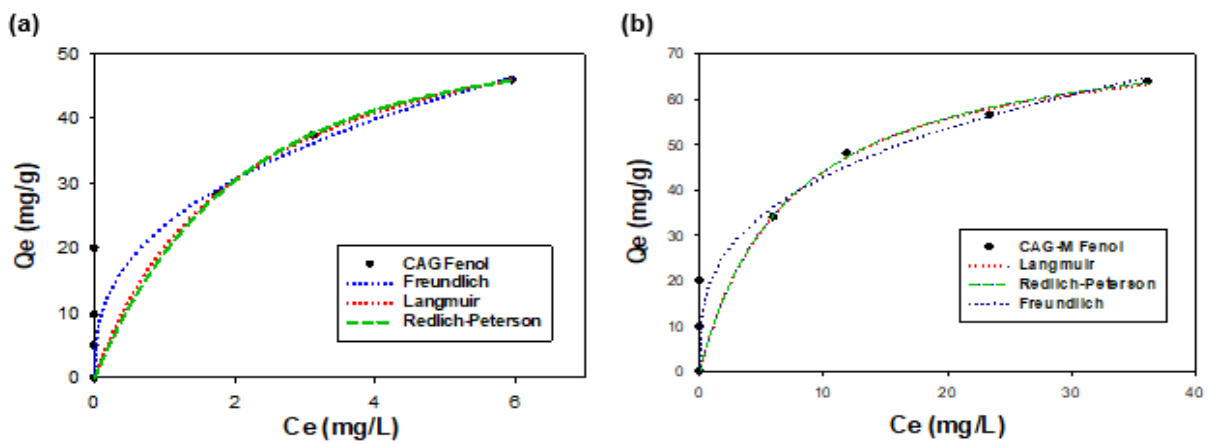


Figura 6. Isotermas de adsorción de fenol para (a) CAG y (b) CAG-M.

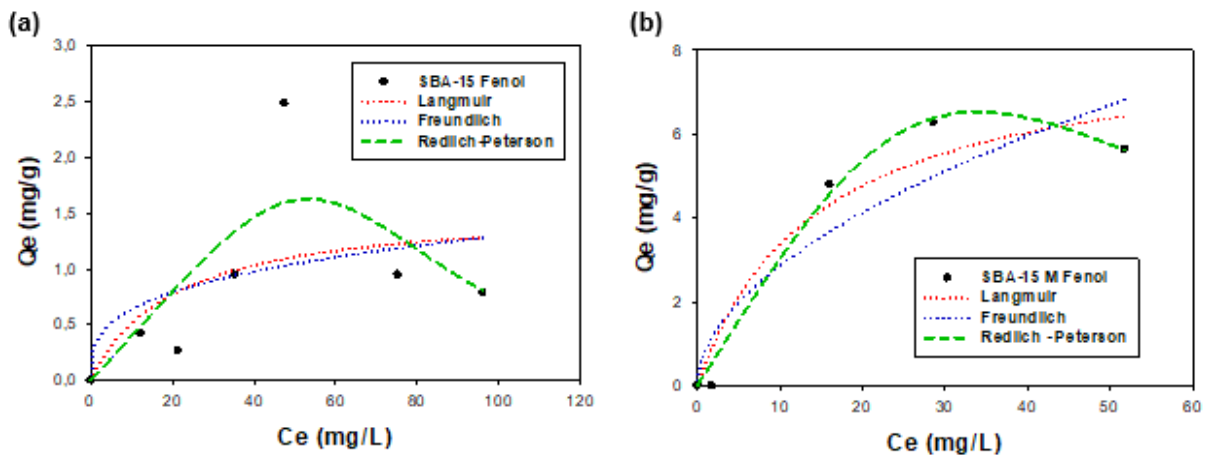


Figura 7. Isotermas de adsorción de fenol SAB-15 y SAB-15 magnetizada.

Realizando la comparación del potencial de la capacidad máxima de adsorción para el fenol, representada por Q_0 del modelo de Langmuir, se puede evidenciar una mayor capacidad de adsorción de las muestras de CAG y CAG-M, puesto que parece que aumentando la concentración de adsorbato se alcanza una capacidad máxima de las concentraciones trabajadas Figura 6.

De acuerdo a la clasificación realizada por Giles [22], las isothermas obtenidas para las muestras GAC y GAC-M en diferente medida presentan un comportamiento semejante a las isothermas tipo L lo cual indica que existen afinidad entre el adsorbente y el adsorbato, a bajas concentraciones, relacionándose con la química superficial del carbón activado y su área superficial disponible para el proceso de adsorción, también sugiere una saturación progresiva del sólido.

En cuanto a las isothermas obtenidas para la sílice mesoestructurada, se observan pendientes a concentraciones bajas, mucho más alejadas del eje Y, evidenciando una menor interacción entre el adsorbato y el adsorbente y por lo tanto menores valores de adsorción de fenol sobre SBA-15 y SBA-15-M, su modificación parecen obedecer a un efecto sinérgico entre la concentración y la capacidad de adsorción, es decir a mayor concentración hay una mayor capacidad de adsorción, al menos para las concentraciones evaluadas, lo que también puede relacionarse con una mejor correlación de los datos cuando son descritos por el modelo de Readlich-Peterson.

Al correlacionar un parámetro textural como el área BET con Q_0 máximo de adsorción obtenido por el modelo de Langmuir del fenol para cada uno de los sólidos, Figura 8, es posible observar una relación inversa, es decir, a pesar que el área superficial disponible ha disminuido drásticamente en los sólidos magnetizados, la capacidad de adsorción es mayor para estos sólidos, lo cual puede sugerir un efecto sinérgico del proceso de adsorción cuando se incluyen las nanopartículas de magnetita, tanto en la superficie del carbón activado como de la sílice mesoestructurada.

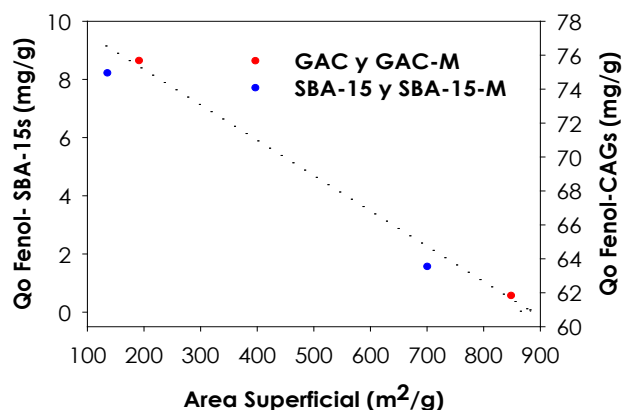


Figura 8. Correlación del área superficial con respecto Q_0 de adsorción del modelo Langmuir para fenol.

5. Conclusiones

La caracterización textural de las muestras magnetizadas muestra que el sólido magnetizado SBA-15-M tiene un volumen de mesoporos de 1,113 cm³/g y un valor de área BET de 136 m²/g mientras que el sólido CAG-M presenta un valor de área BET de 192 m²/g, los valores obtenidos están relacionados con la cantidad de magnetita Fe₃O₄ depositada en el precursor, dichos resultados muestran que el área superficial de los materiales disminuyeron 80,6% y 77,4%, respectivamente, lo cual evidencia que la modificación del carbón activado y la sílice con magnetita por el método de coprecipitación bloquea la porosidad de los sólidos y se genera una porosidad intraparticular.

Bibliografía

- [1] N. Cuizano, B. Llanos y A. Navarro, «Aplicaciones ambientales de la adsorción mediante biopolímeros naturales: parte 1- compuestos fenólicos» *Rev Soc Quím Perú*, vol. 75, n° 4, pp. 495-508, 2009.
- [2] T. Ru-Ling, W. Feng-Chin and J. Ruey-Shin, "Liquid-phase adsorption of dyes and phenols using pinewood-based activated carbons" *Carbon*, no. 41, pp. 487-495, 2003.
- [3] I. Tubert y V. Talanquer, «Sobre adsorción» *Educación Química*, vol. 8, n° 4, pp. 186-190, 1997.
- [4] J. Rouquerol, D. Avnir, C. Fairbridge, D. Everett, J. Haynes, N. Pernicone, J. Ramsay, K. Sing y K. Hunger, «Recommendations for the characterization of porous solids» *Pure and Applied Chemistry*, vol. 66, n° 8, pp. 1739-1758, 1994.
- [5] R. R. Leyva, «Importancia y aplicaciones de la adsorción en fase líquida» *Sólidos porosos*, vol. 1, pp. 155-209, 2007.
- [6] S. Porada, R. Zhao, A. van der Wal, V. Presser and P. Biesheuvel, "Review on the science and technology of water desalination by capacitive deionization" *progress in materials science*, vol. 58, pp. 1388-1442, 2013.
- [7] P. J. Moreno, L. Navarrete y L. Giraldo, «Adsorción de Fenol y 3-Cloro Fenol sobre Carbones Activados mediante Calorimetría de Inmersión Adsorption of Phenol and 3-Chlorophenol n Activated Carbons using Immersion Calorimetry» *Información Tecnológica*, vol. 18, n° 3, pp. 71-80, 2007.
- [8] L. Gao, Y. Wang, J. Wang, L. Huang, L. Shi, X. Fan y Z. Zou, «A Novel Zn II -Sensitive Fluorescent Chemosensor Assembled within Aminopropyl-Functionalized Mesoporous SBA-15» *Inorganic Chemistry*, vol. 45, n° 17, pp. 6844-6850, 2006.
- [9] N. Arellano, M. Zurita y V. Saso, «Síntesis de sílices mesoporosas tipo SBA-15 a partir de un silicato de sodio de Venezuela Mesoporous SBA-15 synthesis using a venezuelan sodium silicate,» *Ciencia*, vol. 1, pp. 224-231, 2008.
- [10] M. Khabazipour, S. Shariati and F. Safa, "SBA and KIT-6 mesoporous silica magnetite nanoparticles: Synthesis and characterization," *Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry*, pp. 1553-3182, 2015.

[11] S. Ruiz, D. Granados, I. Fernández, B. Diéz y H. Silva, «Síntesis de carbones activados magnéticos a partir de cascarrón de coco» *Infomin*, vol. 7, nº 1, pp. 35-44, 2015.

[12] J. Peter Atkins, *ATKINS' PHYSICAL CHEMISTRY*, Portland: W. H. Freeman and Company, 1983.

[13] J. M. Zuluaga, «Una mirada al estudio y las aplicaciones tecnológicas y biomédicas de la magnetita» *EIA*, nº 16, pp. 207-223, 2011.

[14] P. Rodríguez, «Comparación de las Interacciones Energéticas de SBA-15, Carbones Mesoporosos Organizados y Carbones Modificados Químicamente en la Adsorción de Metales desde Solución Acuosa» pp. 28-185, 2016.

[15] P. Vigón, «Síntesis de materiales mesoporosos compuestos de sílice/carbono y su empleo como plataforma para la fabricación de materiales con propiedades avanzadas» pp. 35-42, 2013.

[16] F. Sotomayor, K. Cychosz y M. Thommes, «Characterization of micro/mesoporous materials by physisorption: concepts and case studies» *mater surf*, vol. 3, pp. 34-50, 2018.

[17] J. H. Kwon, L. D. Wilson y Sammynaiken.R., «Synthesis and characterization of magnetite and activated carbon binary composites» *Synthetic Metals*, vol. 197, p. 8-17, 2014.

[18] P. Moson, «Understanding adsorption/desorption hysteresis for fluids in mesoporous materials using simple molecular models and classical density functional theory» *Microporous mesoporous mater*, pp. 47-66, 2012.

[19] M. Thommes, K. Kaneko, A. Neimark, J. Oliver, F. Rodríguez-Reinoso, J. Rouquerol y S. Sing, «Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC technical report)» *IUPAC technical report*, 2015.

[20] T. Kjellman, S. Asahina, J. Schmitt, M. Imperor-clerc, O. Terasaki y M. Alfredsson, «Direct observation of plugs and intrawall pores in SBA-15 using low voltage high resolution scanning electron microscopy and the influence of solvent properties on plug formation» *Chem mater*, vol. 25, nº 20, pp. 4105-4112, 2013.

[21] J. Contreras, H. F. Fuenmayor, M. Colina, A. Díaz, N. Fernández, M. Pérez y G. Colina, «Capacidad adsorptiva del carbón activado preparado a partir del bagazo de la caña de azúcar para la adsorción de fenol, 2-clorofenol, 2-nitrofenol y 2,4-dimetilfenol» *Ciencia*, vol. 16, nº 1, pp. 111-121, 2008.

[22] C. Giles, T. MacEwan, N. S. N. y D. Smith, «Studies in Adsorption. Part XI. A System» *Journal of the Chemical Society*, vol. 846, pp. 3973-3993, 1958.

[23] L. Navarrete, G. Liliana y M. J.C., «Influencia de la química superficial en la entalpía de inmersión de carbones activados en soluciones acuosas de fenol y 4-nitrofenol» *Revista colombiana de Química*, vol. 35, nº 2, pp. 215-224, 2006.

[24] C. Gonzales y R. Rojas, «Guías para manejo seguro y gestión ambiental de 25 sustancias químicas» *consejo colombiano de seguridad*, pp. 217-220.