

Study of different chemical activatings on obtaining activated carbon from *Hymenaea courbaril* L shell for cadmium (II) removal

Nelson Poleo, Solaida Oliveros, Marinela Colina, Nancy Rincón,
Johan Mesa y Gilberto Colina*

Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (DISA), Escuela de Ingeniería Civil,
Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia (LUZ), Apartado 526,
Maracaibo 4001-A, Venezuela. gjcolina@hotmail.com

Abstract

The use of $ZnCl_2$, H_3PO_4 , H_2SO_4 , HNO_3 and HCl for algarrobo fruit shell activation (*Hymenaea courbaril* L) permitted to evaluate and compare the adsorptive capacity of the corresponding carbons prepared. The precursor was impregnated with the chemical agents mentioned, separately and it was pyrolyzed at $500^\circ C$ in each case. The superficial characteristics of the activated carbons prepared were determined through the Brunnauer-Emmet-Teller (S_{BET}) conventional method, obtaining adsorption isotherms of N_2 at 77K and were compared to those of the Norit-A (CAC) commercial activated carbon. The balance determination at liquid phase of the process was carried out by using cadmium (II) solutions in load essays at initial concentrations (C_0) of 25, 50 and 100 mg/L during 1 h contact time. The cadmium (II) balance concentration was determined by flame atomic adsorption spectrophotometry (EAA). The activated carbons with H_3PO_4 and $ZnCl_2$ presented specific superficial area values (S_{BET}) of 1262 and 968 m^2/g , respectively. The Freundlich and Langmuir models were applied to the experimental results. The isotherms showed better adsorption conditions at solutions with a cadmium (II) C_0 of 25 mg/L for all the carbons prepared. The correlation coefficient values (R^2) and the adsorption constant K_f for activated carbon with H_3PO_4 fit Freundlich's model better.

Key words: Chemical adsorption, activated carbon, heavy metal, adsorption capacity

Estudio de diferentes activantes químicos en la obtención de carbón activado a partir de la cáscara de *Hymenaea courbaril* L. para la remoción de cadmio (II)

Resumen

El uso de diferentes agentes químicos ($ZnCl_2$, H_3PO_4 , H_2SO_4 , HNO_3 y HCl) para la activación de la cáscara del fruto de algarrobo (*Hymenaea courbaril* L.) permitió evaluar y comparar la capacidad adsorptiva de los carbones preparados correspondientes. El precursor fue impregnado con los agentes químicos señalados, por separado y pirolizado a $500^\circ C$ en cada caso. Las características superficiales de los carbones activados preparados (CAA) se determinaron a través del método convencional de Brunauer-Emmet-Teller (S_{BET}), obteniéndose las isotermas de adsorción de N_2 a 77 K y se compararon con las del carbón activado comercial Norit-A (CAC). La determinación del equilibrio en fase líquida del proceso se realizó utilizando soluciones de cadmio (II) en ensayos por carga a concentraciones iniciales (C_0) de 25, 50 y 100 mg/L, durante un tiempo de contacto de 1 h. La concentración en equilibrio de cadmio (II) se determinó

por espectrofotometría de absorción atómica por llama (EAA). Los carbones activados con H_3PO_4 y $ZnCl_2$ presentaron valores de área superficial específica (S_{BET}) de 1262 y 968 m^2/g , respectivamente. Se aplicaron los modelos de Freundlich y Langmuir a los resultados experimentales. Las isotermas demostraron mejores condiciones de adsorción en soluciones con una Co de 25 mg/L de cadmio (II) para todos los carbones preparados. Los valores del coeficiente de correlación (R^2) y la constante de adsorción K_f para el carbón activado con H_3PO_4 demostraron un mejor ajuste al modelo de Freundlich.

Palabras clave: Adsorción, carbón activado, activante químico, cáscara de algarrobo.

Introducción

El cadmio (Cd) es un metal pesado que se genera principalmente como sub-producto de la refinación del zinc a partir de sus minerales. Sus aplicaciones incluyen electro-deposición o aleaciones de hierro, pigmentos, baterías y aditivos para plásticos [1]. Al aire puede llegar como sub-producto del procesamiento del acero de desecho, la recuperación del cobre y la refinación del plomo, el cobre y el zinc. También, los fertilizantes fosfatados contienen cadmio que las plantas pueden absorber. Las tuberías de abastecimiento de agua aportan cierta cantidad de cadmio que pasa al agua de consumo [2].

El cadmio es biopersistente y absorbido una vez por un organismo sigue siendo residente por muchos años aunque se excreta eventualmente [1, 2]. En seres humanos, la exposición a largo plazo se asocia a la disfunción renal. La alta exposición puede conducir a la enfermedad obstructora del pulmón y se ha ligado al cáncer de pulmón. Los desechos agroindustriales tales como semillas y cáscaras (como las legumbres de algarrobo) constituyen una gran fuente de materiales carbonosos, necesarios para la producción de carbón activado [3, 4]. Actualmente, los carbones activados ocupan una posición importante dentro de los adsorbentes más comunes, dada su versatilidad y universalidad. Estos carbones revisten interés para algunos sectores económicos y en diversas industrias como, procesadoras de alimentos, farmacéuticas, químicas, petrolera, minera, nuclear, automovilística y en producción de vacunas [5]. La producción de carbón activado puede llevarse a cabo a través de una activación física ó térmica y una activación química por impregnación del precursor con un agente químico a temperaturas moderadas [5]. En este sentido, el presente estudio tiene por objeto determinar el grado de eficiencia de distintos activantes químicos (H_3PO_4 , H_2SO_4 , HNO_3 , HCl y $ZnCl_2$) en la pre-

paración de carbones activados provenientes de la cáscara de *Hymenaea courbaril* L comparando las capacidades de adsorción de los mismos para remover cadmio (II) en soluciones preparadas a 25, 50 y 100 mg/L.

Parte Experimental

1. Recolección de la muestra adsorbente

Las muestras de algarrobo (*Hymenaea courbaril* L.), fueron colectadas en las inmediaciones de la población de Los Puertos de Altagracia, municipio Miranda del estado Zulia. Para la obtención del precursor se abrió el fruto, salvando la cáscara y descartando el resto (pulpa y semilla). Colectadas las cáscaras, fueron limpiadas, trituradas y posteriormente molidas, secadas y tamizadas hasta obtener la granulometría requerida (1,00-0,850mm).

2. Activación y caracterización del adsorbente

Se utilizaron cinco agentes activantes, para luego pirolizar el material a 500°C (773 K), durante 1 hora [6, 7], dando origen a la nomenclatura de los carbones en estudio. La nomenclatura fue la siguiente: activación con ácido fosfórico, CAA-773- H_3PO_4 ; con ácido sulfúrico, CAA-773- H_2SO_4 ; con ácido nítrico, CAA-773- HNO_3 ; con cloruro de zinc, CAA-773- $ZnCl_2$, todas las soluciones de los activantes, preparadas al 40% y con solución de ácido clorhídrico al 37%, CAA-773- HCl . Las cáscaras se impregnaron con cada una de las soluciones mencionadas en un envase de vidrio pyrex con tapa, dejándolas reaccionar durante un lapso de 10 a 12 horas. Se agregó 150 g del precursor en 450 mL del agente activante respectivo (relación 1:3). La caracterización físico-química de los diferentes carbones preparados se llevó a cabo mediante un análisis próximo

(densidad aparente, contenido de ceniza y humedad), siguiendo los procedimientos descritos en las Normas ASTM D2854-96 (2000), ASTM D2866-94, ASTM D2867-99 (1999) respectivamente [8, 9, 10]. Los carbones obtenidos fueron lavados con agua caliente y llevados a un pH de 6.5 a 7.0 con solución alcalina [2].

La determinación del pH del carbón se llevó a cabo según el procedimiento estándar descrito en la Norma ASTM [11]; se utilizó un agitador mecánico marca Eberbach de 115 voltios, la determinación del pH del carbón se llevó a cabo usando un pHmetro marca Corning modelo 120. El procedimiento se ejecutó tantas veces fue requerido hasta lograr el ajuste del pH (6,5 a 7,0) agregando solución alcalina de NaOH (0,2N) en pequeñas cantidades [12].

Se utilizó el modelo convencional de Brunauer-Emmett-Teller (BET) a 77 K para la determinación del área superficial específica (S_{BET}), mediante un equipo de fisisorción y quimisorción Micrometrics ASAP 2010 [12, 13].

3. Ensayos de adsorción de cadmio (II) sobre los carbones activados

Se prepararon soluciones de cadmio (II) de 25, 50 y 100 mg/L a un pH de 5,5; se colocó 1g de cada carbón activado en fiolas con 100 mL de solución de cadmio (II) para cada concentración por triplicado y se taparon con papel parafinado. Las fiolas se colocaron en el agitador mecánico, esta-

bleciendo un tiempo de contacto (TC) de una hora. Luego, se filtró al vacío el contenido de cada fiola, utilizando en primer lugar un papel de filtro cualitativo N° 102 y posteriormente papel de filtro de membrana de 0,40 μm . Las soluciones de cadmio (II) filtradas, fueron almacenadas con HNO_3 0,1N en una relación de 1:100 [14]. Posteriormente, se determinó el contenido de Cd (II), utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica (EAA) de llama marca Perkin Elmer modelo 3110 [15].

Resultados y Discusión

1. Análisis fisicoquímico y rendimiento de los carbones activados (análisis próximo)

Los carbones activados preparados con ZnCl_2 y HCl obtuvieron rendimientos en el orden de 36 y 33% respectivamente, mientras que los preparados con H_3PO_4 , H_2SO_4 y HNO_3 obtuvieron un rendimiento de 35%. Todos estos valores se encuentran alrededor del valor reportado por Basso y col. (2001) [16]. Los valores del análisis próximo, tanto del precursor crudo como de los carbones activados preparados (CAA) y del carbón activado comercial (CAC) se observan en la Tabla 1.

El contenido de ceniza tanto para *Hymenaea Courbaril* L. crudo, como para el resto de los carbones preparados, es menor que el obtenido

Tabla 1
Valores de densidad aparente, humedad y cenizas realizados a la cáscara de *Hymenaea courbaril* L. cruda y a los carbones activados CAA-773- ZnCl_2 , CAA-773- H_3PO_4 , CAA-773- H_2SO_4 , CAA-773- HNO_3 , CAA-773-HCl y CAC

Adsorbentes	Densidad aparente (g/cm^3)	Humedad (%)	Cenizas (%)
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	0,61	9,10	3,36
CAA-773- ZnCl_2	0,43	2,00	3,66
CAA-773- H_3PO_4	0,34	4,02	5,48
CAA-773- H_2SO_4	0,48	2,00	5,10
CAA-773- HNO_3	0,29	5,00	3,18
CAA-773-HCl	0,45	1,00	4,91
CAC*	0,39	4,2	8,30

CAC*: carbón activado comercial.

por el carbón activado comercial (CAC). Este resultado se traduce en un bajo contenido de sustancias inorgánicas que favorece el potencial adsorbente en la superficie del carbón activado [6]. Así mismo, estos valores resultaron mayores al obtenido por el precursor crudo, debido posiblemente a la acción del agente activante [17].

La densidad aparente, constituye un buen indicador de la resistencia mecánica del carbón. Según la Tabla 1, estos valores se encuentran cercanos al valor obtenido para el carbón activado comercial (CAC) [18, 19].

2. Área superficial específica según el método convencional de Brunauer-Emmett-Teller, (BET)

En la Tabla 2 se muestran los valores del área superficial específica (S_{BET}), volumen total de poros (V_t), volumen de microporos (V_{micro}), volumen de mesoporos (V_{meso}) y diámetro de poros (d_p) para los carbones activados preparados y el carbón activado comercial (CAC).

Las muestras de CAA-773- H_3PO_4 , CAA-773- $ZnCl_2$, y CAA-773- H_2SO_4 presentaron valores de S_{BET} más altos que el resto de los carbones activados preparados (1262, 968 y 179 m^2/g respectivamente). Valores similares fueron obtenidos por Blasco y col. en su estudio sobre activación química del aserrín de roble bajo condiciones similares [20]. El volumen total de poros (V_t), para el CAA-773- H_3PO_4 fue de 1.158 cm^3/g se-

guidos por CAA-773- $ZnCl_2$, CAA-773- H_2SO_4 y CAA-773- HCl . El volumen de los mesoporos fue mayor para el CAA-773- H_3PO_4 . De acuerdo a los valores de d_p , se pueden clasificar como carbones con alta proporción de mesoporos, según el rango establecido por la IUPAC, el cual es $20 < d < 500 \text{ \AA}$ [21]. La Figura 1, muestra las isotermas de adsorción de N_2 a 77 K, correspondientes según el método convencional de Brunauer-Emmett-Teller (BET), sobre los carbones activados preparados con diferentes agentes químicos.

El carbón preparado con ácido nítrico (HNO_3), no generó un área superficial específica significativa (0,85 m^2/g), es decir, no desarrolló porosidad según el método convencional de BET aplicado a 77 K, por lo tanto la forma de la isoterma no expresa el comportamiento típico para una porosidad específica.

3. Adsorción de cadmio (II) sobre los carbones activados preparados

Los resultados de adsorción de Cd (II) obtenidos a diferentes concentraciones (C_0), con los carbones activados preparados, se determinan mediante la ecuación de q:

$$q = (C_0 - C_e)Vm^{-1} \quad (1)$$

donde m es la cantidad de adsorbente (1 g), V es el volumen de solución de cadmio (100 mL), C_0 es la concentración inicial de dichas soluciones (25, 50 y 100 mg/L) y C_e es la concentración final o en

Tabla 2
Área superficial y estructura porosa de las muestras de carbón activado preparados (CAP-773) con los diferentes activantes y del carbón activado comercial (CAC)

Muestras	S_{BET} (m^2/g)	V_t (cm^3/g)	V_{meso} (cm^3/g)	V_{micro} (cm^3/g)	d_p (\AA)
CAA-773- $ZnCl_2$	968	0,544	0,282	0,262	25,02
CAA-773- H_3PO_4	1262	1,158	1,113	0,044	36,7
CAA-773- H_2SO_4	179	0,104	0,044	0,060	23,10
CAA-773- HNO_3	0,85	-	-	-	200
CAA-773- HCl	88	0,051	0,02	0,031	-
CAC	794	1,016	0,942	0,074	51,2

S_{BET} : área superficial de Brunauer-Elmer-Teller BET. V_t : volumen total de poros. V_{meso} : volumen de mesoporos. V_{micro} : volumen de microporos. d_p : diámetro de poros. CAC: carbón activado comercial (valores tomados de la literatura). Mesoporos: $20 < d < 500 \text{ \AA}$.

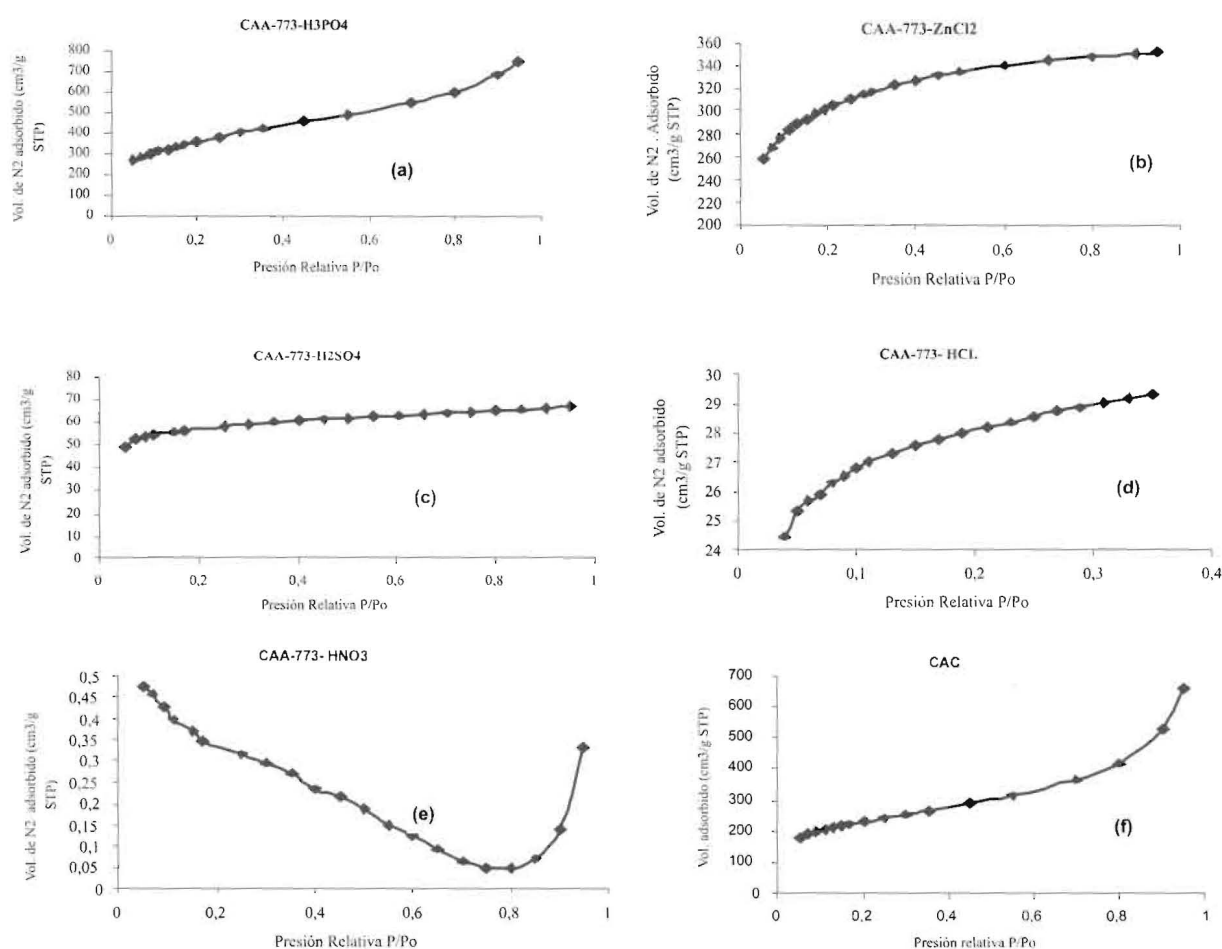


Figura 1. Isothermas de adsorción de N₂ sobre: (a) CAA-773-H₃PO₄, (b) CAA-773-ZnCl₂, (c) CAA-773-H₂SO₄, (d) CAA-773-HCl, (e) CAA-773-HNO₃ y (f) CAC a 77 K según método convencional de Brunauer-Elmer-Teller (BET).

equilibrio obtenida después del proceso. En las Figuras 2 y 3, se presentan los adsorbentes tratados con activantes químicos oxigenados (CAA-773-H₃PO₄, CAA-773-HNO₃, CAA-773-H₂SO₄) y no oxigenados (CAA-773-ZnCl₂ y CAA-773-HCl) respectivamente, utilizando los valores de q ajustados por el modelo de Langmuir. El CAA-773-H₃PO₄ presenta mayor capacidad de adsorción del Cd (II). Los carbonos CAA-773-H₂SO₄ y el CAA-773-HNO₃ adsorben menor cantidad de mg de Cd (II) por gramo de carbón según se observa en la Figura 2.

En la Figura 3 se observa el comportamiento de la adsorción de Cd (II) sobre CAA-773-HCl. La capacidad de adsorción (q) está por encima de la registrada por el CAA-773-ZnCl₂.

Las Figuras 4 y 5 muestran las isothermas de los carbonos activados con los agentes químicos oxigenados (CAA-773-H₃PO₄, CAA-773-H₂SO₄ y CAA-773-HNO₃) y no oxigenados (CAA-773-ZnCl₂ y CAA-773HCl) según los valores de q ajustados a la ecuación de Freundlich.

La forma de la isoterma proporciona información semicualitativa acerca de la naturaleza de las interacciones adsorbato-adsorbente. En términos generales, existe una tendencia de las isothermas a mostrar una forma del tipo L, de acuerdo a la clasificación de Giles [22]. Este comportamiento se debe al hecho de que los sitios activos vacíos se vuelven difíciles de hallar por el progresivo recubrimiento de la superficie por los iones adsorbidos. Este tipo de isothermas corres-

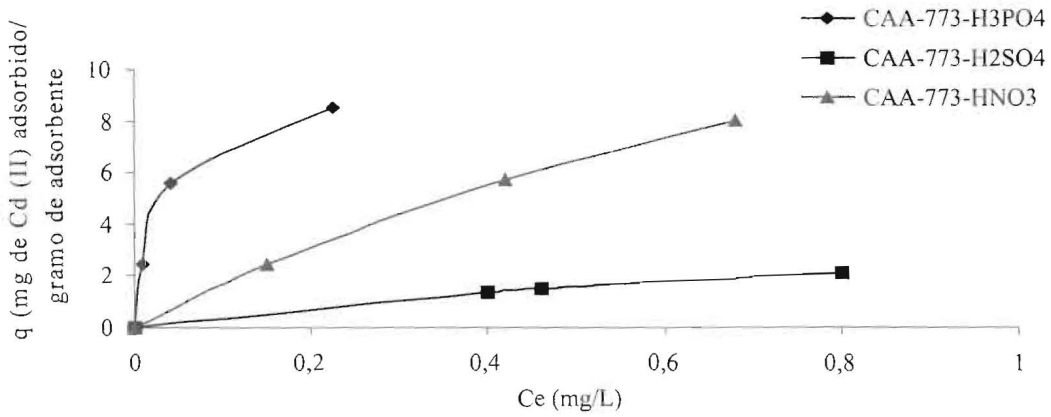


Figura 2. Isotermas de adsorción de Cd (II) sobre carbonos activados oxigenados (CAA-773-H₃PO₄, CAA-773-HNO₃, CAA-773-H₂SO₄) utilizando q ajustado a la ecuación de Langmuir.

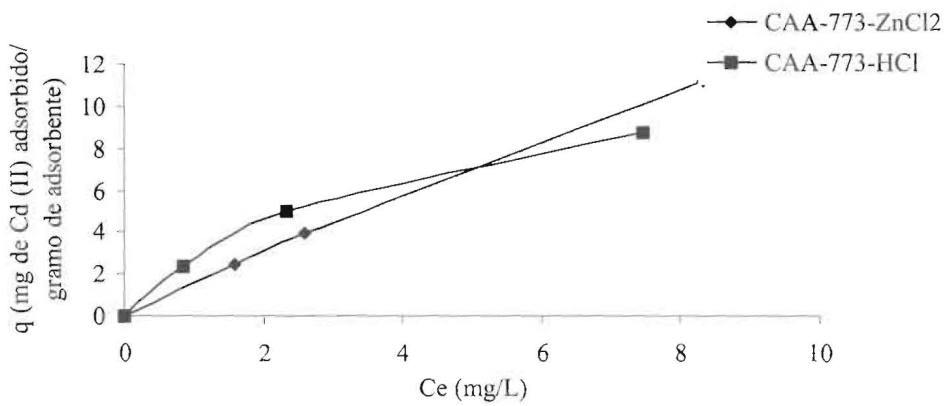


Figura 3. Isotermas de adsorción de Cd (II) sobre carbonos activados no oxigenados (CAA-773-ZnCl₂, CAA-773-HCl) utilizando q ajustado a la ecuación de Langmuir.

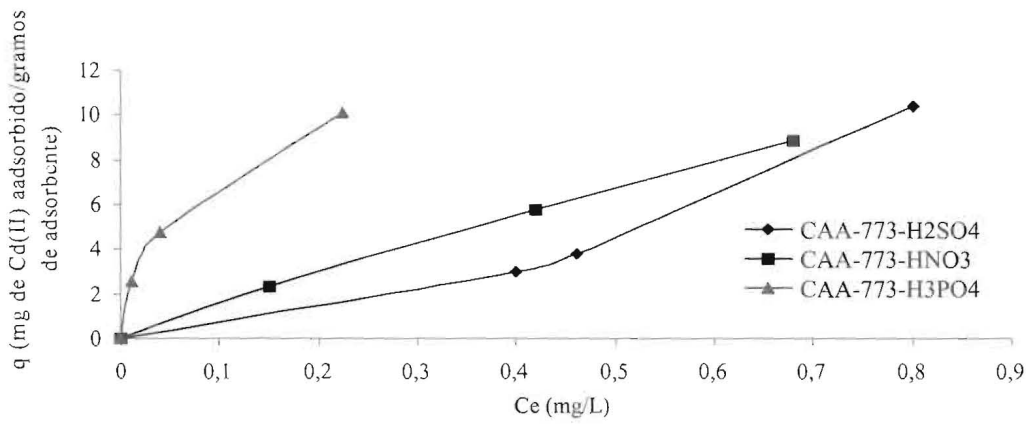


Figura 4. Isotermas de adsorción de Cd (II) sobre carbonos activados oxigenados (CAA-773-H₃PO₄, CAA-773-HNO₃, CAA-773-H₂SO₄) utilizando q ajustado a la ecuación de Freundlich.

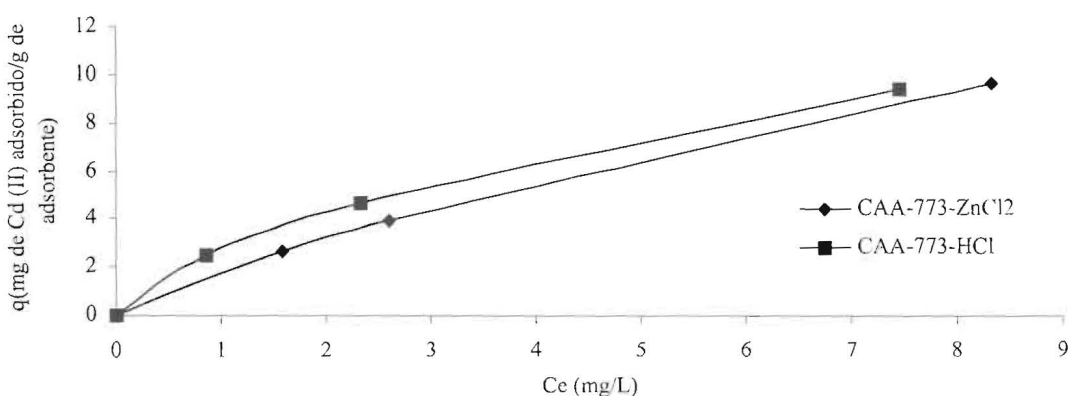


Figura 5. Isotermas de adsorción de Cd (II) sobre carbonos activados no oxigenados (CAA-773-ZnCl₂, CAA-773- HCl) utilizando q ajustado a la ecuación de Freundlich.

ponde a sustratos con cierta microporosidad, del tipo 2C según Giles [22].

Se puede inferir, según las isotermas de las Figuras 2 a 5, que los carbonos preparados desarrollaron una superficie micro y mesoporosa suficientemente favorable al proceso de adsorción a pesar de que algunos obtuvieron áreas superficiales relativamente bajas (CAA-773-H₂SO₄ y CAA-773-HCl). Las Tablas 3 y 4, muestran los valores de la suma de los cuadrados de errores relativos según la ecuación de Myers (SSRE) [23], coeficientes de correlación lineal (R²) y ecuaciones lineales de los modelos de Langmuir y Freundlich respectivamente, aplicados a cada carbón preparado.

El coeficiente de correlación, R², de las ecuaciones lineales permite establecer el grado de correlación lineal entre la capacidad de adsorción (q) y la concentración en equilibrio (Ce).

La suma de los cuadrados de los errores relativos según la ecuación de Myers, fue aplicada a la q experimental y ajustada a cada modelo matemático de la siguiente forma:

$$E_r = \sum \left(\frac{q_{ajustado} - q_{exp}}{q_{exp}} \right)^2 \quad (2)$$

El modelo de Freundlich arrojó coeficientes de correlación (R²) más altos. Para ambos casos (Freundlich y Langmuir), los valores mayores de R² corresponden a CAA-773-HCl y CAA-773-H₃PO₄. El modelo de Freundlich presentó la mayoría de los valores de SSRE_F más bajos. Estos resultados demuestran que dicho modelo, se ajustó mejor el comportamiento de la adsorción de Cd (II) sobre los carbonos activados preparados. En la Tabla 5 se presentan las constantes empíricas de los modelos en estudio.

Tabla 3

Valores de la suma de los cuadrados de los errores relativos (SSRE), según la ecuación de Myers, R² y ecuación lineal obtenidos para los ajustes del modelo de Langmuir en la adsorción de Cd(II) sobre carbón activado

Adsorbentes	SSRE _L	R ²	Ec. Lineal
CAA-773-ZnCl ₂	0,080	0,951	1/q = 0,619 1/Ce + 0,0146
CAA-773-H ₃ PO ₄	0,035	0,984	1/q = 0,003 1/Ce + 0,1035
CAA-773-H ₂ SO ₄	1,280	0,800	1/q = 0,215 1/Ce - 0,1881
CAA-773-HNO ₃	0,061	0,971	1/q = 0,054 1/Ce + 0,0437
CAA-773-HCl	0,050	0,997	1/q = 0,289 1/Ce + 0,0756
Promedios		0,946	

SSRE_L: suma de los cuadrados de los errores relativos de Langmuir según la ecuación de Myers.

Tabla 4

Valores de la suma de los cuadrados de los errores relativos (SSRE), según la ecuación de Myers, R^2 y ecuación lineal obtenidos para los ajustes del modelo de Freundlich en la adsorción de Cd(II) sobre carbón activado

Adsorbentes	SSRE _F	R^2	Ec. Lineal
CAA-773-ZnCl ₂	0,053	0,940	Log q = 0,777 log Ce + 0,27
CAA-773-H ₃ PO ₄	0,003	0,996	Log q = 0,443 log Ce + 1,29
CAA-773-H ₂ SO ₄	0,099	0,891	Log q = 1,795 log Ce + 1,190
CAA-773-HNO ₃	0,043	0,953	Log q = 0,877 log Ce + 1,093
CAA-773-HCl	0,002	0,997	Log q = 0,617 log Ce + 0,434
Promedios		0,9554	

SSRE_F: suma de los cuadrados de los errores relativos de Freundlich según la ecuación de Myers [23].

Tabla 5

Constantes de los modelos de Freundlich y Langmuir calculados al conjunto de datos de adsorción de Cd (II), obtenidos experimentalmente a diferentes concentraciones

Adsorbentes	Freundlich		Langmuir	
	K_F , L/g	n	K , L/mg	b , mg/g
CAA-773-ZnCl ₂	1,868	1,286	0,024	68,49
CAA-773-H ₃ PO ₄	19,810	2,250	9,660	34,510
CAA-773-H ₂ SO ₄	15,490	0,557	0,875	5,320
CAA-773-HNO ₃	12,396	1,140	0,800	22,880
CAA-773-HCl	2,722	1,619	0,261	1,320

La constante empírica K_F que depende de la naturaleza del adsorbente y del adsorbato, representa un buen indicador del proceso de adsorción. Los valores más altos corresponden a CAA-773-H₃PO₄, CAA-773-H₂SO₄ y CAA-773-HNO₃, seguidos de los carbones CAA-773-HCl y CAA-773-ZnCl₂, lo cual le atribuye una buena capacidad de adsorción a los carbones activados oxigenados, especialmente al CAA-773-H₃PO₄. Las Tablas 6 y 7 muestran los valores promedio de la concentración inicial (C_0) y la concentración en equilibrio (C_e) con sus desviaciones estándares en fase líquida.

El porcentaje de adsorción presenta una leve tendencia a disminuir a medida que aumenta C_0 , con leves fluctuaciones en CAA-773-ZnCl₂ y CAA-773-HNO₃. Este comportamiento indica una tendencia de saturación de los sitios activos disponibles en la superficie [24]. La capacidad to-

tal de adsorción (q), tuvo una marcada tendencia a incrementarse con el aumento de C_0 , lo cual, según Jung y col., se atribuye a la tendencia de q a conseguir el equilibrio interfásico (sólido-líquido) a medida que el carbón se expone a mayor cantidad de adsorbato. [21].

Conclusiones

Los carbones preparados a partir de cáscara de algarrobo con ácido fosfórico (CAA-773-H₃PO₄) y cloruro de zinc (CAA-773-ZnCl₂), presentaron mayores áreas superficiales (1262 y 968 m²/g) con respecto al carbón activado comercial (CAC). Los carbones activados preparados demostraron mejores condiciones de adsorción de Cd (II) a concentraciones inicial (C_0) bajas (25 mg/L). Los resultados se ajustaron de mejor forma al modelo de Freundlich. El CAA-773-H₃PO₄, presentó la

Tabla 6

Valores promedios de la concentración en equilibrio en la fase líquida (Ce), cantidad de Cd (II) adsorbido por gramo de carbón activado (q), ajustados al modelo de Freundlich y Langmuir y el porcentaje de adsorción sobre los carbones con agentes no oxigenados

Adsorbente	Co	Ce	Co-Ce	q _{exp}	q _L	q _F	SSRE _L (10 ⁻²)	SSRE _F (10 ⁻²)	% de Ads.
CAA-773ZnCl ₂	25	1,583±0,08	23,417	2,342	2,465	2,669	0,277	1,953	93,7
	50	2,603±0,04	47,397	4,740	3,962	3,920	2,692	2,991	94,8
	100	8,321±0,15	91,679	9,168	11,237	9,690	5,093	0,324	91,7
CAA-773HCl	25	0,850±0,21	24,150	2,415	2,389	2,462	0,012	0,038	96,6
	50	2,330±0,21	47,670	4,767	4,990	4,589	0,219	0,140	95,3
	100	7,460±0,38	92,540	9,254	8,740	9,416	0,310	0,031	92,5

Tabla 7

Valores promedios de la concentración en equilibrio en la fase líquida (Ce), la cantidad de Cd (II) adsorbido por gramo de carbón activado (q), ajustados al modelo de Freundlich y Langmuir y el porcentaje de adsorción sobre los carbones con agentes oxigenados

Adsorbente	Co	Ce	Co-Ce	q _{exp}	q _L	q _F	SSRE _L (10 ⁻²)	SSRE _F (10 ⁻²)	% de Ads.
CAA-773H ₃ PO ₄	25	0,010±0,00	24,990	2,499	2,475	2,560	0,009	0,059	100
	50	0,040±0,01	49,960	4,996	5,601	4,749	1,466	0,244	99,9
	100	0,224±0,07	99,776	9,978	8,553	10,110	2,040	0,017	99,8
CAA-773H ₂ SO ₄	25	0,400±0,02	24,600	2,460	1,378	2,988	19,342	4,607	98,4
	50	0,460±0,01	49,540	4,954	1,525	3,840	47,910	5,057	99,1
	100	0,800±0,13	99,200	9,920	2,188	10,380	60,752	0,221	99,2
CAA-773HNO ₃	25	0,15±0,01	24,850	2,485	2,450	2,346	0,019	0,310	99,4
	50	0,420±0,02	49,580	4,958	5,750	5,788	2,552	2,802	99,2
	100	0,680±0,05	99,320	9,932	8,060	8,833	3,552	1,224	99,3

mejor capacidad de adsorción según los valores de las constantes empíricas obtenidas. El carbón activado CAA-773-HNO₃ no desarrolló área superficial específica significativa.

Agradecimiento

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CONDES) de LUZ por el financiamiento al proyecto de investigación. Al Instituto de Superficies y Catálisis de la Universidad de Zulia (INSUC) por su valiosa colaboración durante la investigación.

Referencias Bibliográficas

- Dickson, T.R. Química Enfoque Ecológico. Editorial LIMUSA S.A. México (1986). 406.
- Basso, M.; Cerrella, E.; Cukierman, A. Activated Carbons Developed from a Rapidly Renewable Biosource for Removal of Cadmium(II) and Nickel(II) Ions from Dilute Aqueous Solutions. J. Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 41, (2002) 180-189.
- Karuppana Periasamy and Chinnaiya Namasivayam. Process Development for

- Renoval and Recovery of Cadmium from Wastewater by a Low-Cost Adsorbent: Adsorption Rates and Equilibrium Studies. *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 33, (1994), 317-320;
4. Marsh, H.; Reinoso, F. *Activated Carbon*. Elsevier Science & Technology Books. Agosto 2006.
 5. Abdel-Nasser A., El-Hendawy, Samra S.E., Girgis B.S. Adsorption Characteristics of Activated Carbons obtained from Corncobs. *Colloids And Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. Vol. 180, (2001) 209-221.
 6. Blanco, J., P. Bonelli, Cerrella, E. y Cukierman, A. Phosphoric Acid Activation of Agricultural Residues and Bagasse from Sugar Cane: Influence of The Experimental Conditions on Adsorption Characteristics of Activated Carbons. *J. Ind. Eng. Chem. Res.* Vol. 39, (2000) 4166-4172.
 7. Girgis, B.; Khalil, L.; Tawfik, A. Activated Carbon from Sugar Cane Bagasse by Carbonization in The Presence of Inorganic Acids. *J. Chem. Tech. Biotechnol.* Vol. 61, (1994) 87-92.
 8. ASTM D2854-96 Standard Test Method for Apparent Density of Activated Carbon. (2000).
 9. ASTM D2866-94 Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon. (1999).
 10. ASTM D2867-99. Standard Test Method for Moisture of Activated Carbon (1999).
 11. ASTM D3838-80 Standard Test Method for Moisture of Activated Carbon (1999).
 12. Ahmedna M., S. Clarke, M. Johns, W. Marshall, R. Rao. Use of Filtration and Buffers in Raw Sugar Colors Measurements *J. Sci. Food Agric.*, Vol. 109. (1997) 117-124.
 13. Ruiz M. Y C. Rolz. Activated Carbons From Sugar Cane Bagasse. *Ind. Eng. Chem. Prod. Res.* Vol. 10, No. 4 429-432.
 14. Lenores, S.; Clescari, A.; Greenberg, A "Standard Methods". American Public Health Asociation (Ed), (1998) 319-320.
 15. Perkin Elmer. *Analytical Methods for Atomic Absorption Spectrophotometry* (1982).
 16. Basso M.; E. Cerella; A. Cukierman. Remoción de Cd (II) de Soluciones Acuosas mediante Carbón Activado Preparado a partir de Caña. *Revista Argentina Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 5 (2001).
 17. Khail, L. "Adsorption characteristics of activated carbon obtained from rice husks treatment with phosphoric acid". *Adsorp. Sci and Tech.* Vol. 13, (1996) 317-321.
 18. Acevedo S., Colina M., Díaz A., Fernandez N., Behling E., Marin J., Colina G. "Activación química del bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en la adsorción de níquel (II) en efluentes industriales. *Rev. Tec. Ing. Universidad del Zulia*. Vol. 30 N° 3 (2007) 44-252.
 19. Contreras J., Fuenmayor H., Colina M., Díaz A., Fernández N., Pérez de Scott M. y Colina G. "Capacidad adsortiva 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". *Revista Ciencia*. Vol. 16, No. 1, (2008) 111-121
 20. Blasco, J.M.; Gómez M., Delgado, F.; Rodriguez M., R.S., Production of active carbons from holm oak sawdust by chemical treatment and pyrolysis under N₂, *Ann Quim.* Vol. 85. (1989) 406-15.
 21. Jung, W.; Ahn, K.; Lee, Y.; Kim, K.; Rhee, J.; Park, J.; Paeng, K. "Adsorption Characteristics of Phenol and Chlorophenols on Granular Activated Carbons (Gac)". *Microchem. J.* Vol. 70. (2001) 123-131.
 22. Giles, Charles H. and Smith David. A General Treatment And Classification Of The Solute Adsorption Isotherm I. Theoretical. *Journal of Colloid and Interfall Science*, Vol. 47, N° 3. (1973) 755-765.
 23. Lu, Q.; Sorial, G. "The role of adsorbent pore size distribution in multicomponent adsorption on activated carbon". *Carbon*. 42. (2004) 133-3142.
 24. Hasar, H. Adsorption of Nickel (II) From Aqueous Solution onto Activated Carbon Prepared from Almond Husk. *J. Hazardous Materials B97*. (2002) 9-57.

Recibido el 19 de Febrero de 2009

En forma revisada el 29 de Enero de 2010