

Adsorción de Cromo (VI) en Solución Acuosa sobre Fibra de Carbón Activado

Roberto Leyva, José V. Flores, Paola E. Díaz y María S. Berber

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ciencias Químicas, Centro de Investigación y Estudios de Posgrado, Av. Dr. Manuel Nava No. 6, 78210 San Luis Potosí, SLP-México
(e-mail: rlr@uaslp.mx)

Resumen

En este trabajo se estudia la adsorción de Cr(VI) en solución acuosa sobre una fibra de carbón activado tipo fieltro. Los datos de equilibrio de adsorción de Cr(VI) sobre la fibra se obtuvieron en un adsorbedor de lote y la concentración de Cr(VI) se determinó por un método colorimétrico. La isoterma de Freundlich ajustó bastante bien los datos experimentales. La capacidad de adsorción disminuyó considerablemente incrementando el pH de 4 a 10, pero aumentó ligeramente incrementando la temperatura de 15 a 35°C. El efecto del pH se debió a las interacciones electrostáticas entre la superficie y los aniones de Cr(VI) en solución. La capacidad de adsorción se comparó con las capacidades de carbones activados granulares de avellana y coco. La capacidad de la fibra fue el doble de la de carbones de cáscara de avellana y la mitad de la de carbones de cáscara de coco.

Palabras claves: adsorción de cromo (VI), fibra de carbón activado, carbones granulares, isoterma de Freundlich

Adsorption of Chromium (VI) from Aqueous Solution onto Activated Carbon Fiber

Abstract

The adsorption of Cr(VI) from aqueous solution on an activated carbon fiber of felt type, was studied. The adsorption equilibrium data of Cr(VI) on the fiber were obtained in a batch adsorber and the concentration of Cr(VI) was determined by a colorimetric method. The Freundlich isotherm fitted reasonably well the experimental data. The Cr(VI) adsorption capacity of the fiber decreased considerably while increasing the solution pH from 4 to 10 but slightly increased as the temperature increased from 15 to 35°C. The effect of the pH was due to the electrostatic interactions between the surface of the fiber and the Cr(VI) anions in solution. The adsorption capacity of the fiber was compared to those of granular activated carbons made from hazelnut shell and from coconut shell. The adsorption capacity of the fiber was twice that of the hazelnut carbon and half of that of the coconut carbon.

Keywords: chromium (VI) adsorption, activated carbon fiber, granular carbon, Freundlich isotherm

INTRODUCCIÓN

La presencia de metales pesados en solución acuosa representa un serio peligro para la salud humana ya que muchos de estos metales son tóxicos. Los metales pesados son emitidos al medio ambiente por fuentes naturales como las erupciones volcánicas y fuentes antropogénicas tales como las descargas de aguas residuales industriales. Entre los principales metales tóxicos destacan el Plomo, Cadmio, Cromo y Mercurio.

El cromo es un metal reductor activo y en el medio ambiente se encuentra principalmente en las formas trivalente, Cr(III) y hexavalente, Cr(VI) (Selvi et al., 2001). La toxicidad y movilidad del cromo depende de su estado de oxidación. El Cr(VI) es muy tóxico y tiene una gran movilidad mientras que el Cr(III) no es tóxico a bajas concentraciones y su movilidad es baja ya que el Cr(OH)₃ es poco soluble.

Las principales fuentes antropogénicas de contaminación del cromo son las actividades mineras e industriales. El cromo se emplea en las siguientes actividades industriales: electroplateado, curtición de pieles, conservación de madera, preparación de aleaciones, minería, cemento, colorantes, galvanoplastia, fabricación de pinturas y material fotográfico (Selvi et al., 2001; Kobya, 2004).

Varios procesos se han desarrollado para eliminar el cromo presente en aguas residuales industriales. Los métodos más comúnmente usados para reducir la concentración de Cr(VI) en solución acuosa son intercambio iónico sobre resinas poliméricas (Leyva-Ramos et al., 2000), coagulación-floculación, adsorción sobre carbón activado y reducción / precipitación química / sedimentación (Peters et al., 1985). Este último método es el más usado pero es muy ineficaz, ya que se produce una gran cantidad de lodos y no se puede recuperar el cromo precipitado, y esto hace que sea muy costoso (Leyva-Ramos et al., 1994).

La adsorción se considera como un método eficiente para eliminar metales pesados presentes en aguas residuales (Aggarwal et al., 1999; Selvi et al., 2001). Diversos materiales adsorbentes se han probado para eliminar Cr(VI) en solución acuosa, entre estos materiales destacan carbón activado, alúmina activada, zeolitas naturales y varios biosorbentes (Aggarwal et al., 1999; Faghihian y Bowman, 2005; Khezami y Capart, 2005; Margarida Alves et al., 1993; Mor et al., 2007).

Existen diferentes formas de carbón activado, las más usadas son el carbón activado granular (CAG) y el carbón activado en polvo (CAP). Recientemente, se ha desarrollado una nueva presentación de carbón activado que es la fibra de carbón activado (FCA). Las FCA se pueden fabricar en forma de tela o fieltro (Suzuki, 1994). Las FCA tienen una estructura porosa casi totalmente microporosa (Suzuki, 1994) y presentan varias ventajas en comparación con los carbones granulares, entre éstas sobresalen baja caída de presión, alta capacidad de adsorción y rápida velocidad de adsorción (Le Cloirec et al., 1997; Leyva-Ramos et al., 2005).

Khezami y Capart (2005), investigaron la adsorción de Cr(VI) en solución acuosa sobre un carbón activado granular preparado a partir de madera, y encontraron que la capacidad de adsorción aumenta disminuyendo el pH de la solución e incrementando la temperatura. Selvi et al. (2001), estudiaron la adsorción Cr(VI) sobre un carbón activado fabricado a partir de cáscara de coco y encontraron que la máxima capacidad de adsorción ocurrió a pH=3, pero esto se debió a que Cr(VI) se redujo a Cr(III) a este pH. Jayson et al. (1993), realizaron estudios acerca de la adsorción de Cr(VI) y Cr(III) sobre una tela de carbón activado y demostraron que la masa de Cr(VI) adsorbido sobre la tela fue cercana a 10 veces mayor que la de Cr(III). Además, observaron que la capacidad de la tela para adsorber Cr(VI) aumentó considerablemente al incrementar el pH de 3 a 11, y concluyeron que este efecto se debió a las interacciones electrostáticas entre los iones cromato y la carga superficial de la tela.

El objetivo principal de este trabajo es investigar la adsorción de Cr(VI) en solución acuosa sobre una FCA tipo fieltro, así como estudiar el efecto del pH y la temperatura de la solución sobre la capacidad de la FCA para adsorber Cr(VI).

MATERIALES Y MÉTODOS

Fibra de carbón activado

En este trabajo se utilizó una fibra de carbón activado tipo fieltro (FCA), conocida comercialmente como AM1132. Esta FCA se fabricó a partir poliacrilonitrilo (PAN) por la compañía KoTHmex.

Caracterización de la FCA

Las propiedades de textura de la FCA (área específica, volumen de los poros y el diámetro promedio de los poros), se determinaron por medio de un equipo de fisisorción de N_2 (Micromeritics, ASAP 2010). La superficie externa de las fibras de carbón activado se examinó usando un microscopio electrónico de barrido (Leica-Cambridge, S420-i).

La carga superficial de la FCA se determinó mediante el siguiente procedimiento: Se pesaron 0.1 g de la FCA molida en un mortero de ágata y se agregaron a 20 mL de una solución 0.01 M KCl - 0.004 M KOH. La solución se mantuvo en agitación continua durante 48 horas. La solución conteniendo la FCA se tituló con una solución 0.1 M HCl en una atmósfera de nitrógeno para desplazar el CO_2 presente en el aire y evitar que se absorba formando CO_3^{2-} y HCO_3^{-1} . La titulación se efectuó adicionado 0.1 mL cada 8 minutos. Por otro lado, se tituló una solución de 0.01 M KCl - 0.004 M KOH pero sin FCA (Babic et al., 1999). El punto de carga cero (PCC) de la FCA corresponde al pH al cual ocurre la intersección de la curva de titulación con adsorbente y la curva de titulación sin adsorbente.

Los sitios ácidos y básicos de la FCA se determinaron mediante el método de titulación ácido-base propuesto por Boehm (1994).

Determinación de la concentración de Cr(VI)

La concentración de Cr(VI) en solución acuosa se determinó por un método colorimétrico indirecto. Este método se basa en la reacción entre el Cr(VI) y la difenilcarbazida, que produce un complejo de color violeta (APHA, 1992). La determinación cuantitativa de Cr(VI) en una muestra se realizó desarrollando el color y midiendo la absorbancia de la muestra en un espectrofotómetro de UV-Visible de doble haz (Shimadzu, UV-160), a una longitud de onda de 540 nm. La concentración de la muestra se calculó por medio de una curva de calibración (concentración de Cr(VI) vs. absorbancia) que previamente se preparó usando 4 o 6 soluciones estándar. Estas soluciones se prepararon al mismo pH de la muestra.

Procedimiento para obtener los datos de equilibrio de adsorción

Los datos experimentales del equilibrio de adsorción de Cr(VI) se obtuvieron en un adsorbedor de lote que constó de un matraz Erlenmeyer de 500 mL. Al adsorbedor se le agregaron una solución de Cr(VI) y una determinada masa de FCA. El adsorbedor se sumergió parcialmente en un baño de temperatura constante. La solución se mezcló continuamente por medio de una barra de agitación magnética recubierta de Teflón, accionada por una placa de agitación que se encontraba debajo del baño de temperatura constante.

Se preparó una solución de Cr(VI) de concentración inicial conocida, se ajustó el pH de esta solución y se tomó una muestra para corroborar posteriormente su concentración inicial. La concentración inicial varió en el intervalo entre 2 y 50 mg/L. Un determinado volumen (480 mL) de esta solución se transfirió al adsorbedor de lote y luego, se le agregó una bolsa de malla PET conteniendo una cierta masa de FCA (0.3 a 0.5 g). La solución y FCA se dejaron en contacto hasta que se alcanzó el equilibrio. El pH de la solución se mantuvo constante adicionando soluciones 0.1 N de HNO_3 y NaOH, según sea el caso. Los volúmenes adicionados se registraron para después considerarlos en el cálculo del volumen total. La solución se muestreó cada cierto tiempo y se determinó la concentración de Cr(VI) en las muestras. Se consideró que se había alcanzado el equilibrio cuando las concentraciones de Cr(VI) de dos muestras sucesivas variaron menos de 3% entre sí. En

experimentos preliminares se encontró que un periodo de 5 días era suficiente para alcanzar el equilibrio. La masa de Cr(VI) adsorbido sobre FCA se estimó por medio de un balance de masa de Cr(VI).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la FCA

En un trabajo anterior (Leyva-Ramos et al., 2005), se caracterizó la FCA tipo fieltro y los resultados se muestran en la Tabla 1. El área específica fue cercana a 1200 m²/g y el volumen de poro fue ligeramente menor de 0.60 cm³/g. Suzuki (1994) mostró que las FCA fabricadas a partir de celulosa y PAN presentaron áreas específicas y volúmenes de poro muy similares a los que se encontraron en este trabajo. Como se muestra en la Tabla 1 el diámetro promedio de los poros es cercano a 2 nm. Esto indica que la estructura porosa de la FCA está constituida principalmente por microporos. Resultados similares han sido encontrados por Le Cloirec et al. (1997), Li et al. (1998) y Faur-Brasquet et al. (2002).

Las concentraciones de los sitios activos de la FCA se muestran en la Tabla 1. Se nota que la concentración de sitios ácidos es mayor que la de los sitios básicos. La concentración de sitios ácidos está por debajo y la concentración de sitios básicos es muy similar a los valores observados para FCA fabricadas a partir de PAN (Rangel Mendez y Streat, 2002).

Tabla 1: Propiedades de textura y fisicoquímicas de la FCA.

Propiedad	Valor
Área específica (m ² /g)	1219
Volumen de los poros (cm ³ /g)	0.59
Diámetro promedio de poros (nm)	1.95
Sitios ácidos (meq/g)	0.61
Sitios básicos (meq/g)	0.44
Punto de Carga Cero, PCC	4.3

La FCA tipo fieltro se muestra en la Fig. 1 y se observa claramente que no existe orden en el arreglo de las fibras, cada fibra esta formada por varios filamentos del material precursor original y el diámetro promedio de los filamentos es de 3 µm.



Fig. 1: Fotomicrografía de la FCA tipo Feltro a 250 aumentos.

En la Fig. 2 se muestra la carga de la superficie de la FCA tipo fieltro y se indica el punto de carga cero (PCC). La carga superficial del carbón es positiva para valores de pH menores al PCC, neutra cuando el pH es igual al PCC y negativa para valores de pH mayores al PCC. Este comportamiento

es típico de los carbones activados y de las FCA, y ha sido observado en otros trabajos (Babic et al., 1999).

La superficie de la FCA tenía carácter ácido ya que el PCC de la FCA fue de 4.3. Este valor es muy cercano al PCC = 4.24 de una FCA fabricada de PAN (Park y Jung, 2001). Esto confirma que la concentración de sitios ácidos era mayor que la de los básicos.

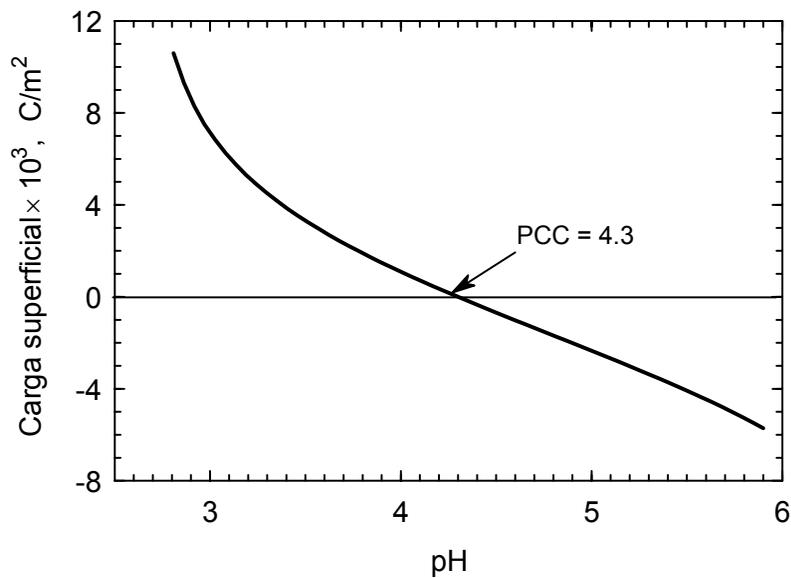


Fig. 2: Distribución de la carga superficial de la FCA tipo fieltro.

Isotermas de adsorción

Los datos experimentales del equilibrio de adsorción se interpretaron con las isotermas de adsorción de Freundlich y Langmuir, las cuales se representan matemáticamente por medio de las ecuaciones siguientes:

$$q = kC^{1/n} \tag{1}$$

$$q = \frac{q_m KC}{1 + KC} \tag{2}$$

Donde q es la masa de Cr(VI) adsorbido sobre la FCA, mg/g; q_m es la máxima masa de Cr(VI) adsorbido, mg/g; C es la concentración de Cr(VI) en el equilibrio, mg/L; K es la constante de la isoterma de Langmuir, L/mg; k es la constante de la isoterma de Freundlich, mg^{1-1/n} L^{1/n} g⁻¹; y n es la constante de la isoterma de Freundlich.

Las constantes de estas isotermas se estimaron utilizando un método de mínimos cuadrados, basado en el algoritmo de optimización de Rosenbrock-Newton, que utilizó la función objetivo siguiente:

$$R = \sum_{i=1}^N (q_{exp} - q_{cal})^2 = \text{Mínimo} \tag{3}$$

Además, se evaluó el porcentaje de desviación promedio por medio de la ecuación siguiente:

$$\% \text{Desv} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{q_{exp} - q_{cal}}{q_{exp}} \right| \right) \times 100\% \tag{4}$$

Donde N es el numero de datos experimentales, q_{exp} es el valor experimental de la masa de Cr(VI) adsorbido sobre FCA, mg/g y q_{pred} es la masa de Cr(VI) adsorbido sobre FCA que se predice con la isoterma, mg/g.

En la Tabla 2 se muestran los valores de las constantes y los porcentajes de desviación promedio de las isotermas de Freundlich y Langmuir. En la Tabla 2 se observa que la isoterma de Freundlich ajustó mejor los datos experimentales del equilibrio de adsorción que la de Langmuir, ya que en la mayoría de los casos los porcentajes de desviación de la primera (5.52 a 17.8%) son menores que los de la segunda (9.02 a 21.1%). Probablemente esto se debe a que en la isoterma de Freundlich se supone que la superficie del adsorbente es energéticamente heterogénea. Es decir que los sitios activos en la superficie son muy diversos. Es bien sabido que la superficie de todas las formas de carbón activado, incluyendo la FCA, es muy heterogénea ya que contiene muy diversos tipos de sitios ácidos y básicos (Boehm, 1994; Babic et al., 1999).

Tabla 2: Constantes de la isoterma de adsorción

pH	T (°C)	Freundlich			Langmuir		
		k ($mg^{1-1/n} L^{1/n}/g$)	n	% Desv	q_m (mg/g)	K (L/mg)	% Desv
4	25	39.7	6.71	7.62	64.4	1.46	7.62
6	15	1.38	1.78	11.4	16.7	0.046	11.4
	25	2.34	2.19	5.52	14.4	0.11	5.52
	35	2.71	2.26	8.69	15.9	0.12	8.69
8	25	1.54	3.83	17.8	4.16	0.36	17.8
10	25	0.40	2.45	17.6	2.23	0.100	17.6

En estudios anteriores se ha encontrado que la isoterma de Freundlich ajustó mejor los datos experimentales del equilibrio de adsorción de Cr(VI) sobre un carbón activado granular y una FCA (Leyva et al., 1994; Jayson et al., 1993). Sin embargo, Aggarwal et al. (1999) estudiaron la adsorción de Cr(VI) sobre una FCA y los datos de equilibrio de adsorción presentaron el comportamiento asintótico típico de la isoterma de Langmuir.

Efecto del pH en la isoterma de adsorción

Este efecto se investigó determinando la isoterma de adsorción del Cr(VI) sobre la FCA a los valores de pH de 4, 6, 8 y 10 y los resultados se muestran en la Fig. 3. En varios trabajos sobre la adsorción de Cr(VI) sobre carbón activado granular fabricado a partir de diferentes materiales precursores, se ha encontrado que el Cr(VI) se convirtió en Cr(III) a $pH < 6$ y se ha demostrado que esta reacción se debió a la acción reductora del carbón activado (Khezami y Capart, 2005; Leyva et al., 1994). En el caso particular de la FCA usada en este trabajo, se observó que el Cr(VI) se redujo a Cr(III) cuando $pH \leq 3$. Esto se comprobó evaluando la concentración de Cr(III) en solución acuosa, la cual es la diferencia entre la concentración de cromo total [Cr(VI) + Cr(III)] y la concentración de Cr(VI). La concentración de Cr(VI) se determinó por el método colorimétrico descrito anteriormente, y la concentración de cromo total por un método espectrofotométrico de absorción atómica. Por esta razón, no se obtuvieron datos de equilibrio de adsorción de Cr(VI) sobre FCA a $pH \leq 3$.

Es importante mencionar que el Cr(VI) en solución acuosa puede formar diferentes hidrocomplejos, los cuales dependen del pH de la solución y de la concentración total de Cr(VI) (Leyva et al., 1994). Los hidrocomplejos de Cr(VI) que se forman principalmente en solución acuosa son bicromato ($HCrO_4^-$), cromato (CrO_4^{2-}) y dicromato ($Cr_2O_7^{2-}$). El $HCrO_4^-$ es la especie predominante a pH menores de 7 y la especie más abundante es CrO_4^{2-} a pH mayores de 8. A pH de 6 la distribución molar de las especies de Cr(VI) es 74% como $HCrO_4^-$ y 26% como CrO_4^{2-} .

En la Fig. 3 se observa que la máxima capacidad de la FCA ocurrió a $pH = 4$ y disminuyó considerablemente incrementando el pH de la solución. A una concentración de Cr(VI) en el equilibrio de 30 mg/g, la masa de Cr(VI) adsorbido a $pH=4$ es cercana a 6, 18 y 40 veces mayor que la masa adsorbida a $pH=6$, $pH=8$ y $pH=10$, respectivamente. La mayor capacidad de adsorción se encontró a

pH=4 y se atribuyó a que a este pH la superficie de la FCA está cargada positivamente (PCC=4.3) y existe atracción electrostática entre el HCrO_4^- y la superficie de la FCA. A pH mayores de 4.3 la carga de la FCA era negativa y había repulsión entre a superficie de la FCA y los aniones HCrO_4^- y CrO_4^{2-} presentes en solución. La magnitud de la repulsión aumentó incrementando el pH porque la carga negativa de la superficie de la FCA creció con el pH (Ver Fig. 2), y esto ocasionó que la capacidad de adsorción disminuyera.

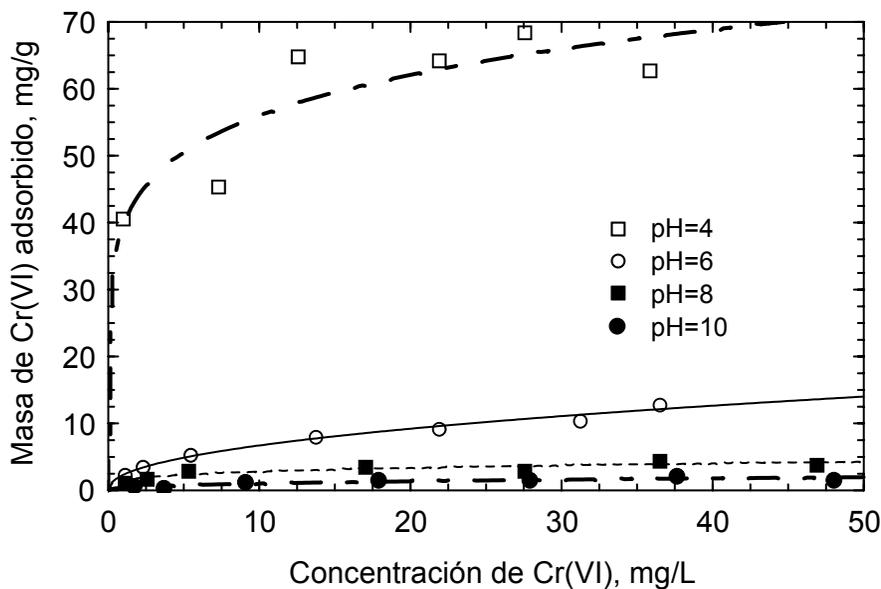


Fig. 3: Efecto del pH en la isoterma de adsorción de Cr(VI) sobre FCA a T=25°C.

La capacidad de la FCA se redujo cerca de 3 veces cuando el pH se incremento de 6 a 8. El HCrO_4^- predomina a pH=6 mientras que el CrO_4^{2-} prevalece a pH=8. Una posible explicación de este comportamiento es que la FCA es más selectiva por HCrO_4^- que por CrO_4^{2-} .

Efecto de la temperatura en la isoterma de adsorción

El efecto de la temperatura se investigó determinando la isoterma de adsorción a las temperaturas de 15, 25 y 35°C. Los datos experimentales del equilibrio de adsorción de Cr(VI) sobre la FCA y las isotermas de adsorción se muestran en la Fig. 4. En esta figura, se observa que la capacidad de la FCA se incrementó muy levemente al aumentar la temperatura. Esta tendencia reveló que la adsorción fue endotérmica, ya que el equilibrio de adsorción se favoreció aumentando la temperatura.

El calor isostérico de adsorción se estimó por medio de la ecuación siguiente (Do, 1998):

$$\frac{\Delta H_{ads}}{RT^2} = \left(\frac{\partial \ln C}{\partial T} \right)_q \tag{5}$$

Donde T es la temperatura absoluta, K; hH_{ads} es el calor isotérico, KJ/mol; y R es la constante de los gases ideales, $8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Los valores del hH_{ads} disminuyeron de 53.9 a 22.5 KJ/mol cuando la masa de Cr(VI) adsorbido decreció de 2.5 a 8.6 mg/g. Esto demuestra que la adsorción es endotérmica. Por otro lado, el hecho de que el hH_{ads} disminuyó con la masa de Cr(VI) adsorbido indica que el Cr(VI) se adsorbió primero en los sitios más energéticos y corrobora que la superficie de la FCA es energéticamente heterogénea. Por esta razón, la isoterma de Freundlich ajustó mejor los datos de equilibrio de adsorción.

Comparación de las capacidades de diferentes adsorbentes para adsorber Cr(VI)

A pH=6 y T=25°C la capacidad de adsorción de la FCA se comparó con las capacidades de dos carbones activados granulares. El primer carbón se le conoce comercialmente como CG y se fabricó a partir de cáscara de coco (Leyva et al., 1994). El segundo es un carbón activado que se preparó a partir de cáscara de avellana (Kobyá, 2004). En la Fig. 5 se muestran las isothermas de adsorción del Cr(VI) sobre la FCA y los dos carbones activados granulares (CAG).

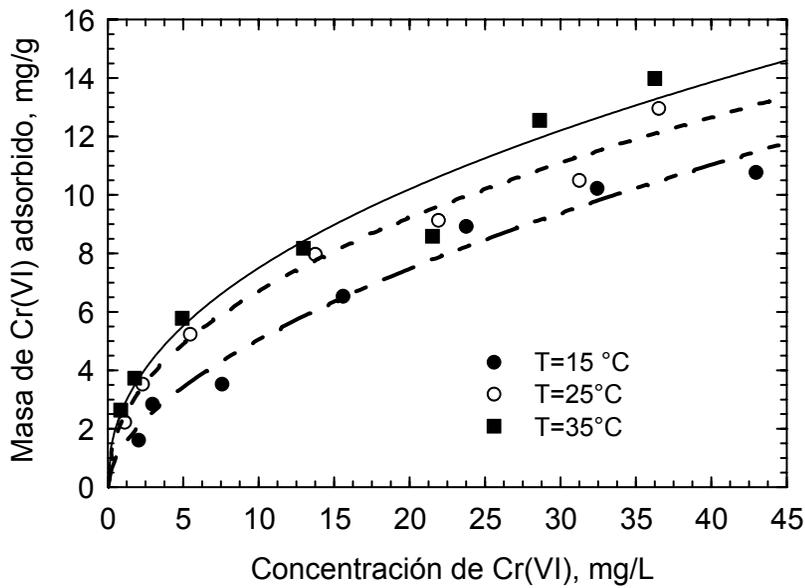


Fig. 4: Efecto de la temperatura en la capacidad de adsorción de la FCA a pH=6.

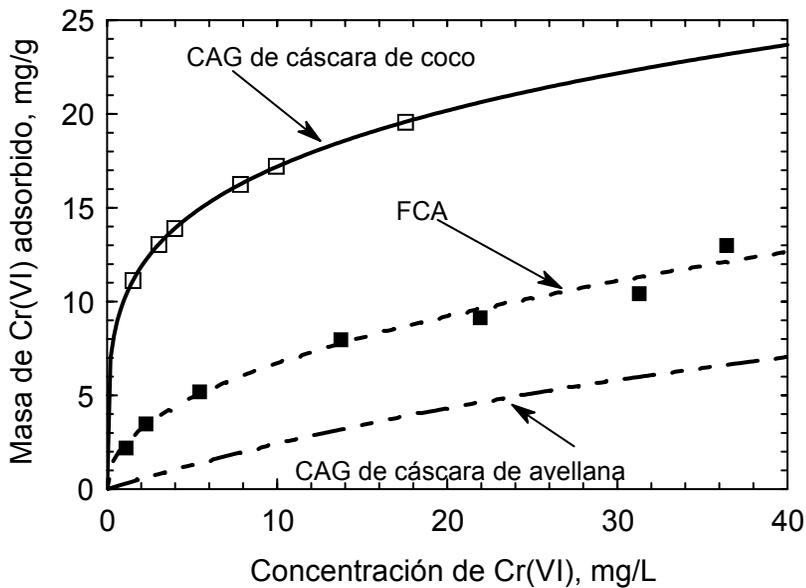


Fig. 5: Comparación de las capacidades de adsorción de Cr(VI) sobre diferentes adsorbentes a pH=6 y T=25°C.

En la Fig. 5 observa que el CAG de cáscara de coco tiene mayor capacidad de adsorción que la FCA mientras que la FCA tiene mayor capacidad que el CAG de cáscara de avellana. La comparación de las capacidades de adsorción se efectuó estimando la masa de Cr(VI) adsorbido a la misma concentración de Cr(VI) en el equilibrio de 30 mg/L, las masas de Cr(VI) adsorbido son 5.81, 11.1 y 22.2 mg/g para el CAG de cáscara de avellana, FCA y CAG de cáscara de coco, respectivamente. Esto indica que la capacidad de adsorción de la FCA es casi el doble que la del CAG de cáscara de avellana pero es la mitad de la del CAG de cáscara de coco.

En varios trabajos se ha demostrado que la adsorción de aniones sobre carbón activado ocurre principalmente en los sitios básicos del carbón activado (Leyva Ramos, 2007). El hecho de que las tres formas de carbón activado presenten diferentes capacidades de adsorción se puede deber principalmente a la concentración y tipo de sitios básicos que tenía cada forma. Además, las propiedades de textura y fisicoquímicas de la superficie de cada forma, afectan la capacidad de adsorción.

CONCLUSIONES

La isoterma de Freundlich ajustó mejor los datos de equilibrio de adsorción del Cr(VI) que la de Langmuir. Se consideró que esto se debió a que la superficie de la FCA es muy heterogénea ya que contiene diversos tipos de sitios activos.

La capacidad de la FCA tipo fieltro para adsorber Cr(VI) aumentó considerablemente reduciendo el pH de la solución. Este comportamiento se atribuyó a las interacciones electrostáticas entre los aniones de Cr(VI) en solución y la carga superficial de la FCA. El hidrocoplejo que más se adsorbió sobre la FCA es el HCrO_4^- ya que la máxima capacidad de adsorción ocurrió a pH menores de 6 y en estas condiciones la especie más abundante es el HCrO_4^- .

El equilibrio de adsorción de Cr(VI) sobre FCA es endotérmico ya que la capacidad de la FCA tipo fieltro para adsorber Cr(VI) se incrementó levemente aumentando la temperatura. La capacidad de la FCA tipo fieltro para adsorber Cr(VI) esta dentro del intervalo de las capacidades de adsorción que presenta el carbón activado granular.

REFERENCIAS

- Aggarwal, D., M. Goyal y R.C. Bansal; *Adsorption of Chromium by Activated Carbon from Aqueous Solution*, Carbon: 37, 1989-1997 (1999).
- APHA, *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*; 18ª edición, 3.58-3.60. American Public Health Association, Washington, DC, USA (1992).
- Babic, B.M., S.K. Milonjic, M.J. Polovina y B.V. Kaludierovic; *Point of Zero Charge and Intrinsic Equilibrium Constants of Activated Carbon Cloth*, Carbon: 37, 477-481 (1999).
- Boehm, H.P.; *Some Aspects of the Surface Chemistry of Carbon Blacks and other Carbons*: Carbon: 32, 759-769 (1994).
- Do, D.D.; *Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics*, 1ª edición, 265-268. Imperial College Press, Londres, UK (1998).
- Faghihian, H. y R.S. Bowman; *Adsorption of Chromate by Clinoptilolite Exchanged with various Metal Cations*, Water Res.: 39, 1099-1104 (2005).
- Faur-Brasquet, C., H. Metivier-Pignon y P. Le Cloirec; *Activated Carbon Cloths in Water and Wastewater Treatments*, Res. Adv. Water Res.: 2, 1-19 (2002).
- Jayson, G.G., J.A. Sangster, G. Thompson y M.C. Wilkinson; *Adsorption of Chromium from Aqueous Solution onto Activated Charcoal Cloth*, Carbon: 31(3), 487-492 (1993).
- Khezami, L. y R. Capart; *Removal of Chromium(VI) from Aqueous Solution by Activated Carbons: Kinetic and Equilibrium Studies*, J. Hazard. Mat.: B123, 223-231 (2005).
- Kobyas, M.; *Adsorption, Kinetic and Equilibrium Studies of Cr(VI) by Hazelnut Shell Activated Carbon*, Adsorpt. Sci. Technol.: 22, 51-64 (2004).

Le Cloirec, P., C. Brasquet y E. Subrenat; *Adsorption onto Fibrous Activated Carbon: Applications to Water Treatment*, Energy & Fuels: 11, 331-336 (1997).

Leyva Ramos, R., A. Juarez Martinez y R.M. Guerrero Coronado; *Adsorption of Chromium (VI) from Aqueous Solutions on Activated Carbon*, Wat. Sci. Technol.: 30, 191-197 (1994).

Leyva Ramos, R., R.M. Guerrero Coronado, L. Fuentes Rubio y J. Mendoza Barrón; *Remoción de Cromo Hexavalente y Trivalente de Solución Acuosa por medio de Resinas de Intercambio Iónico*, Información Tecnológica: 11(3), 93-100 (2000).

Leyva-Ramos, R. y otros cuatro autores; *Adsorption of Cadmium(II) from an Aqueous Solution onto Activated Carbon Cloth*, Sep. Sci. Technol.: 40(10), 2079-2094 (2005).

Leyva Ramos, R., *Importancia y Aplicaciones de la Adsorción en Fase Líquida*, En Sólidos Porosos. Preparación, Caracterización y Aplicaciones por J.C. Moreno-Piraján, pp. 155-207, Ediciones Uniandes, Bogotá, Colombia (2007).

Li, Z., M. Kruk, M. Jaroniec y S-K. Ryu; *Characterization of Structural and Surface Properties of Activated Carbon Fibers*, J. Colloid Interface Sci.: 204, 151-156 (1998).

Margarida Alves y otros cinco autores; *Chromium Removal in Tannery Wastewater "Polishing" by Pinus Silvestris Bark*, Wat. Res.: 27, 1333-1338 (1993).

Mor, S., K. Ravindra y N.R. Bishnoi; *Adsorption of Chromium from Aqueous Solution by Activated Alumina and Activated Charcoal*, Biores. Technol.: 98, 954-957 (2007).

Park, S-J. y W-Y. Jung; *Removal of Chromium by Activated Carbon Fibers Plated with Cooper Metal*, Carbon Sci.: 2(1), 15-21 (2001).

Peters, R.W., Y. Ku y D. Bhattacharyya; *Evaluation of Recent Treatment Techniques for Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewater*, AIChE Symp. Ser.: 81(243), 165-203 (1985).

Rangel Mendez, J.R. y M. Streat; *Adsorption of Cadmium by Activated Carbon Cloth: Influence of Surface Oxidation and Solution pH*, Water Res.: 36(5), 1244-1252 (2002).

Selvi, K., S. Pattabhi y K. Kadirvelu; *Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution by Adsorption onto Activated Carbon*, Biores. Technol.: 80, 87-89 (2001).

Suzuki, M.; *Activated Carbon Fiber: Fundamentals and Applications*, Carbon: 32(4), 577-586 (1994).