

Adsorción de Fenol en soluciones acuosas empleando monolitos de carbón activado de cáscara de Coco: isothermas y cinéticas de adsorción

Juan Carlos Moreno-Piraján^{*1}, Liliana. Giraldo², Juan Felipe Gonzalez³

¹Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Grupo de Investigación en Sólidos Porosos y Calorimetría, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. ²Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Colombia. ³Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química, Grupo de Investigación en Sólidos Porosos y Calorimetría-Departamento de Química, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Adsorption of phenol in aqueous solutions using activated carbon monoliths of Coco shell: adsorption isotherms and kinetics

Adsorció de Fenol en solucions aquoses emprant monòlits de carbó activat de closca de coco: isoterms i cinètiques d'adsorció

Recibido: 11 de abril de 2011; revisado: 25 de julio de 2011; aceptado: 26 de julio de 2011

RESUMEN

En esta investigación se obtuvo carbón activado por activación química con ácido fosfórico (H_3PO_4) al 85% a partir de material cáscara de Coco, el cual fue conformado en estructuras rígidas de geometrías Monolíticas, específicamente geometrías disco y “panal de abejas” o honeycomb. El carbón activado obtenido fue empleado en la remoción de fenol en soluciones acuosas con concentraciones iniciales entre 10 y 100 mg/L en sistemas batch a temperatura ambiente. Las determinaciones se realizaron mediante espectrofotometría UV-Visible. Se analizó el fenómeno de adsorción desde el punto de vista cinético. También fueron estudiadas las isothermas, empleando diversos modelos. Los modelos de isoterma de adsorción empleados presentaron muy buena correlación con los datos experimentales obtenidos, excepto en la geometría honeycomb con el modelo de Redlich-Paterson, las gráficas obtenidas permiten describir el proceso de adsorción como un proceso de formación de monocapa en la superficie del adsorbente, debido a la forma característica de Isoterma tipo Langmuir presentada para prácticamente todos los modelos de isoterma.

Palabras clave: Adsorción, cinética de adsorción, isoterma de adsorción, solución acuosa, carbón activado, Monolito.

SUMMARY

This research was obtained activated carbon by activated chemical with phosphoric acid (H_3PO_4) to 85% from coconut shell material, which was formed in structures monolithic geometry rigid, specifically disk geometries and “honeycomb”. The activated carbon obtained was used in the removal of phenol in aqueous solutions with initial concentrations between 10 and 100 mg / L in batch systems at room temperature. Measurements were made using UV-Visible spectrophotometry. The adsorption phenomena from the kinetic point of view and isotherms were also

studied, using different models. The adsorption isotherm models used showed good correlation with experimental data, except for the honeycomb geometry model with Redlich-Paterson, the graphs obtained for describing the adsorption process as a process of formation of monolayer on the surface of adsorbent, because the characteristic shape of Langmuir isotherm provided for virtually all isotherm models.

Keywords: Adsorption, Adsorption kinetic, Adsorption Isotherm, aqueous solution, activated carbon, Monolith.

RESUM

En aquesta investigació es va obtenir carbó activat per activació química amb àcid fosfòric (H_3PO_4) al 85% a partir de material closca de coco, el qual va ser conformat en estructures rígides de geometries monolítiques, específicament geometries disc i niu d'abella o *Honeycomb*. El carbó activat obtingut va ser emprat en la eliminació de fenol en solucions aquoses amb concentracions inicials entre 10 i 100 mg/L en sistemes batch a temperatura ambient. Les determinacions es van realitzar mitjançant espectrofotometria UV-Visible. Es va analitzar el fenomen d'adsorció des del punt de vista cinètic. També van ser estudiades les isoterms, emprant diversos models. Els models de isoterma d'adsorció emprats van presentar molt bona correlació amb les dades experimentals obtingudes, excepte en la geometria *Honeycomb* amb el model de Redlich-Paterson, les gràfiques obtingudes permeten descriure el procés d'adsorció com un procés de formació de monocapa a la superfície de l'adsorbent, a causa de la forma característica de Isoterma tipus Langmuir presentada pràcticament per tots els models de isoterma.

Paraules clau: Adsorció, cinètica d'adsorció, isoterma d'adsorció, solució aquosa, carbó activat, monòlit.

* Autor para la correspondencia: jumoreno@uniandes.edu.co

INTRODUCCIÓN

La adsorción de solutos orgánicos en soluciones acuosas, es una rama que ha sido de gran investigación y seguimiento en la aplicación del carbón activado, debido a las altas capacidades de adsorción de este material, sus cinéticas rápidas de adsorción y su facilidad de regeneración, relacionada con su estructura porosa, su área superficial y la estructura química de la superficie [1]. Esta rama de la adsorción, cubre una gran variedad de sistemas de gran magnitud, como el tratamiento de aguas contaminadas y aguas para el consumo humano, además de su uso en las industrias de alimentos y de química farmacéutica [2]. Los derivados fenólicos, son compuestos que pertenecen a un grupo de contaminantes de carácter tóxico y en casi todos los casos cancerígenos; las fuentes industriales de este tipo de contaminantes son las refinerías de aceite, plantas de gasificación de carbón, unidades petroquímicas, las cuales generan grandes cantidades de fenoles, además, los derivados fenólicos son usados en la síntesis de plásticos, colorantes, pesticidas, insecticidas; por lo tanto su degradación es un indicativo de la aparición de fenoles en el ambiente [3].

Los carbones activados se pueden obtener a partir de varios materiales que contengan contenido carbonoso, a partir de activación térmica y/o activación química. La activación térmica se realiza con vapor de agua y/o dióxido de carbono, con temperaturas de proceso de 800°C a 1000°C; en la activación química, se mezcla el material carbonoso con un agente químico, y las temperaturas de proceso están alrededor de los 500°C.

Para analizar la capacidad que tiene un carbón activado de adsorber una determinada molécula en su superficie, se determinan las isothermas de adsorción, las cuales permiten obtener información acerca del comportamiento del carbón activado frente a la molécula en particular y así poder concluir acerca si carbón activado bajo estudio es apropiado para un uso en particular. Las isothermas de adsorción de la forma Langmuir (L) frecuentemente ocurren, aunque las premisas de la teoría de Langmuir no se cumplan. Las isothermas de tipo Langmuir (F) -típicas para superficies heterogéneas- son tal vez, las más comunes en la adsorción de soluciones acuosas.

Existen varios factores que afectan el fenómeno de adsorción en sistemas líquido-sólido, como los son [4]: la naturaleza física del adsorbente (estructura porosa, contenido de cenizas, grupos funcionales), la naturaleza del adsorbato (pKa, grupos funcionales presentes, polaridad, peso molecular y tamaño de molécula) y por último, las condiciones de la solución, como el pH, la fuerza iónica y la concentración del adsorbato.

En este estudio, fueron elaborados sistemas batch, sin agitación constante y a temperatura ambiente, donde se emplearon estructuras rígidas de carbón activado llamadas monolitos con pH de carácter neutro, de dos diferentes geometrías -canal y disco- sintetizados a partir de la activación química de cáscara de coco como agente precursor, en soluciones de fenol de 10 mg/L hasta 100 mg/L, con intervalos de solución de 10 mg/L; el seguimiento de la adsorción se hizo por medio de espectrofotometría UV-VIS con tiempos experimentales de 2 semanas. Por medio de los resultados obtenidos, se realizaron isothermas de adsorción de fenol y estudio de la cinética de adsorción, para evaluar la etapa determinante en este proceso de adsorción en específico.

Modelos de Isotherma de adsorción.

Las isothermas de adsorción son la relación entre la cantidad adsorbida de una sustancia y su concentración en

el equilibrio, todo a temperatura constante. Las isothermas de adsorción son herramientas vitales en el diseño de sistemas de adsorción para una tarea específica a partir de la correlación de los datos experimentales, de por sí, es importante obtener información del equilibrio de adsorción en un sistema dado [5]. Al existir varios modelos que indagaran acerca de las isothermas de adsorción, es posible obtener información variada [5] y valiosa como los mecanismos y pasos determinantes del proceso de adsorción y las propiedades superficiales y afinidad del sorbente [6]. En la mayoría de modelos se emplean las mismas variables para la determinación de los valores característicos a diferentes niveles en el proceso de adsorción. La variable Q_e es la cantidad adsorbida de soluto de la solución por gramo de adsorbente en el equilibrio (mg/g), C_e es la concentración de soluto en la solución en el equilibrio (mg/L). Se emplean varios modelos que suministran información sobre el tipo de interacción entre el adsorbato y el adsorbente. Se pueden mencionar entre los más utilizados en los sistemas de adsorción desde solución acuosa los de Freundlich, Langmuir, Temkin, Dubinin-Raduskevich (D-R), Flory-Huggins, Halsey, y el de Toth [6-10]. El utilizar cada uno de estos modelos a los datos obtenidos en este tipo de estudios permite tener una descripción amplia de cómo ocurre la adsorción del adsorbato sobre el adsorbente.

Modelos de cinéticas de adsorción

En los procesos de difusión, se hace necesario identificar el mecanismo o paso dominante en la adsorción, tales como la transferencia de masa, la reacción química, etc. Existe una variedad de modelos cinéticos para comprobar los resultados experimentales de la adsorción del fenol en los monolitos de carbón activado. Se utilizarán tres modelos cinéticos con el fin de analizar el mecanismo de difusión: pseudo primer orden, pseudo segundo orden y difusión intraparticular; los modelos que presenten mayor coeficiente de correlación ($R^2=1$), indicará la mejor aplicabilidad de algún modelo cinético en particular.

Pseudo Primer Orden

El modelo cinético de pseudo primer orden de Lagergren fue el primer modelo experimental que usando la capacidad de adsorción, indagaba el comportamiento difusivo de la adsorción de fenol. El modelo lineal es el siguiente:

$$\log(Q_e - Q_t) = \log(Q_e) - \frac{k_1}{2.303} t \quad (1)$$

Donde Q_e y Q_t , son la capacidad de adsorción en el equilibrio y en un cierto tiempo t , ambas en (mg/g), k_1 es la razón constante de la adsorción de pseudo primer orden en (min^{-1}) [6]. En este modelo, la variación en la tasa de adsorción debería ser proporcional a la primera potencia de la concentración para una adsorción estrictamente superficial. El no existir linealidad en este modelo, es aducido a la limitante de la difusión entre poros, a partir de la pendiente y el intercepto, se pueden deducir los valores de k_1 y corroborar los valores de Q_e experimentales contra los teóricos; si hay gran discrepancia entre estos valores, la cinética de pseudo primer orden no describe este sistema.

Pseudo Segundo Orden

El modelo cinético de pseudo segundo orden relaciona la sorción química entre el adsorbato y adsorbente, y es basado en la capacidad de sorción del sólido. El modelo lineal es el siguiente [12]:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2)$$

Donde q_t es la cantidad de metal adsorbido en un tiempo específico t en (mg/g), t es el tiempo (min), Q_e , capacidad de adsorción en equilibrio (mg/g), K_2 es la constante de la ecuación (g/mg-min); por lo tanto, para lograr deducir las constantes de la cinética de segundo orden, es necesario realizar una gráfica de (t/q_t) Vs. (t) , de la cual se debería obtener una línea recta y a partir de su pendiente e intercepto, se puede obtener la concentración de equilibrio teórica y la constante de la ecuación, respectivamente; el valor de Q_e teórico es comparado con el experimental de la medición, si los valores son muy cercanos, el modelo obedece al modelo de pseudo segundo orden.

Difusión intrapartícula

Como los modelos mencionados anteriormente no permiten determinar un mecanismo de difusión específico en el proceso de adsorción de fenol en la superficie carbonácea. La difusión intrapartícula es el paso limitante en la tasa de adsorción del adsorbato en el adsorbente [6]. El modelo está basado a la teoría propuesta por Weber y Morris, donde el acercamiento al equilibrio de adsorción está dado por una función con variables: difusividad del soluto y radio de la partícula adsorbida [q_t Vs $t^{1/2}$].

METODOLOGÍA

Adecuación del precursor

La cáscara de coco es secada durante dos horas a 110°C, para retirar la humedad del material precursor; luego se moltura la cáscara hasta un tamaño de partícula lo bastante pequeño, escogiendo tamaños máximos de 38 μ m por medio de filtrado en mallas estándar.

Activación y Síntesis de monolitos de carbón activado de cáscara de coco.

El método de obtención de carbón activo fue por medio de activación química con ácido fosfórico (H_3PO_4) a concentración de 85%, en proporciones definidas másicas 4:1 de agente químico y cáscara de coco.

Con la mezcla precursor-agente químico, se procede a secar durante dos horas a 110°C, para retirar la mayor cantidad de solvente de la mezcla y mejorar el proceso de extrusión de los monolitos. La extrusión de los monolitos se lleva a cabo en una prensa de construcción local, donde, temperatura de 150°C y presiones de 5000 a 6000 psi, son las condiciones de operación en la síntesis de los monolitos.

Después de obtenidos los monolitos, se proceden a carbonizar en un horno Thermolyne 79330 Tube furnace, en atmósfera de nitrógeno, con rampa de calentamiento de 2°C/min hasta 500°C, temperatura a la cual estarán expuestos los monolitos por dos horas más.

Después de carbonizados los monolitos, se lavan constantemente con agua caliente para reducir las trazas de ácido fosfórico y estabilizar el pH superficial hacia uno neutro.

Isotermas y cinéticas de adsorción

Seguimiento por espectrofotometría UV-Visible

El seguimiento de la adsorción de fenol en los monolitos de carbón activado, fue hecho a partir de espectrofotometría UV-Visible, donde, al realizar barridos a varias concentraciones, se optó por emplear una longitud de onda (λ) de 271 nm, además, se realizó una curva de calibración.

Observando la relación, se puede tener un alto grado de confiabilidad en los resultados analizados, debido a la muy buena correlación (Factor R^2) que se puede obtener.

Isotermas de adsorción

En este estudio, fueron elaborados sistemas batch de 50 mL, con agitación esporádica y a temperatura ambiente,

con soluciones de fenol de 10 mg/L hasta 100 mg/L, con intervalos de solución de 10 mg/L; el seguimiento de la adsorción se hizo por medio de espectrofotometría UV-VIS con tiempos experimentales de 2 semanas, con mediciones diarias de absorbancia para determinar la cantidad adsorbida de fenol en los monolitos.

Cinéticas de adsorción

Se realizó para cada geometría de monolito, un sistema batch de 100 mL con concentración de 100mg/L de fenol, con dos monolitos sumergidos para evaluar el comportamiento de la capacidad de adsorción de los monolitos en el tiempo, según su geometría, esto también fue realizado a partir de un seguimiento por espectrofotometría UV-Visible, con un tiempo de experimentación de 100 horas; se deja éste tiempo de acuerdo a nuestra experiencia con este tipo de sistemas [13].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calibración en la espectrofotometría UV-Visible

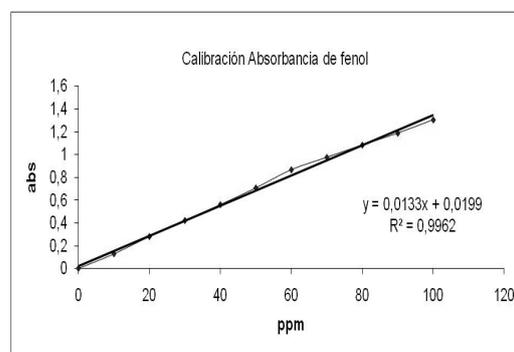


Figura 1. Curva de calibración obtenida experimentalmente para soluciones de Fenol de 0 a 100 mg/L por espectrofotometría UV-Visible.

La ecuación para poder calcular la concentración de fenol en soluciones acuosas fue obtenida a partir de una regresión lineal de los datos obtenidos al analizar la absorbancia de una solución de fenol en varias concentraciones, pudiéndose deducir una ecuación de carácter lineal que relaciona la absorbancia medida con la concentración de las soluciones de fenol.

La ecuación es la siguiente:

$$\text{Absorbancia} = 0,0133 * [\text{Concentración}] + 0,0199 \quad R^2=0,9962 \quad (3)$$

Por lo tanto, al conocer la absorbancia de la solución, es posible encontrar la concentración de fenol en ésta, despejando la ecuación; además, para garantizar los resultados obtenidos, tanto las isotermas de adsorción como las cinéticas de adsorción, fueron llevadas a cabo en el rango de 0 a 100 mg/L con que se realizó la curva de calibración.

Isotermas de adsorción

En la figura 2 se muestran los cinco modelos de isotermas de adsorción desde solución utilizados interpretar el proceso fisicoquímico de adsorción de fenol en la superficie carbonosa de los monolitos con geometría Disco y Honeycomb. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1, donde el modelo de Freundlich tuvo valores de correlación bastante buenos, lo que el fenómeno de adsorción puede ser comparable con el modelo de Langmuir. Los valores de n para las geometrías honeycomb y disco (2,9965 y 3,6764 respectivamente) permiten afirmar dos ideas: una adsorción normal

tipo Langmuir (debido a que $1/n < 0$) y la adsorción favorable del Fenol en la superficie del Monolito de carbón activado. Los resultados obtenidos para el modelo de Langmuir son presentados en la Tabla 1, donde se muestran valores de correlación bastante buenos, lo que muestra que la adsorción de Fenol en soluciones acuosas siga el modelo de Isoterma de Langmuir, además, la máxima capacidad de la monocapa (Q_m) obtenida fue de 27,5340 mg/g para la geometría Honeycomb y para la Disco fue de 30,3526 mg/g; estos resultados muestran que las estructura tipo disco favorece ligeramente el proceso de adsorción sobre la geometría honeycomb. Esto se debe al empaquetamiento que posee este tipo de estructura y permite que la difusión de las moléculas de fenol sea mayor y queden retenidas al interior de la mencionada estructura. Además de éste aspecto, las características de superficie son importantes y explican tales diferencias.

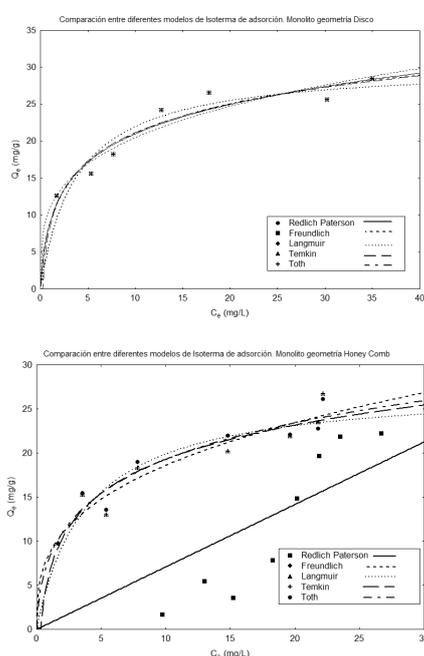


Figura 2. Diferentes modelos de isoterma de adsorción de fenol en monolitos de carbón activado de geometrías disco y honeycomb.

Los datos obtenidos experimentalmente también se analizaron con el modelo lineal de Temkin, y observando la Figura 2 junto a la información de la Tabla 1, se puede confirmar una muy buena correlación de las gráficas de isoterma presentadas, tanto para la geometría Disco como para la honeycomb. Los calores de adsorción calculados a partir de la correlación de Temkin fueron los siguientes: 5,5749 J/mol para la geometría Honeycomb y 5,5472 J/mol para la geometría Disco; además, el demostrar buenos coeficientes de correlación (R^2) con los coeficientes de los modelos de Langmuir y Freundlich, podemos confirmar que el modelo de Temkin es un modelo que podemos emplear en el análisis de la adsorción de fenol de soluciones acuosas en Monolitos de carbón activado de Cáscara de Coco.

Los resultados obtenidos empleando el modelo de Toth son de muy buen desempeño, debido a los buenos coeficientes de correlación (R^2) obtenidos (Veáse Tabla 1.); además, este modelo brinda nuevas ideas de la capacidad de adsorción del adsorbente, debido a sus suposiciones respecto a la distribución gaussiana de energía y a

la gran diferencia en los valores de la capacidad máxima del adsorbente ($Q_{m\max}$ [mg/g]) entre los modelos de Toth y de Langmuir, que es uno de los más reconocidos a nivel de estudios de adsorción. El modelo de Redlich-Paterson permite indagar acerca de la obediencia del proceso de adsorción hacia los modelos de Freundlich y Langmuir respectivamente, valores de $\beta=0$ indicarían un comportamiento probable tipo Freundlich, mientras que valores de $\beta=1$, indicarían una tendencia hacia isoterma tipo Langmuir. El análisis de este modelo de tres parámetros fue hecho con el software especializado STATISTICA™, buscando encontrar valores concretos para estos parámetros encontrando la mayor correlación (R^2) posible. Para la geometría Honeycomb, el posible comportamiento sería tipo Freundlich, pero se obtuvo un coeficiente de correlación no muy alto (0,8580) que no permite confirmar dicha información. Para el caso de la geometría Disco, la tendencia de la isoterma parece ajustarse hacia una tipo Langmuir, debido a su valor de β cercano de 1 ($\beta=0,85$) y de una buena correlación de los datos obtenida ($R^2=0,9577$), lo que da suficiente información para confirmar esta conclusión.

Cinéticas de adsorción

El modelo de pseudo primer orden, demostraría que la variación en la velocidad de sorción debería ser proporcional a la primera potencia de la concentración para un proceso estrictamente de adsorción superficial; como se aprecia en la Figura 3, la adsorción de fenol en la geometría Honeycomb y Disco se encuentra mucho más distante de este tipo de comportamiento, a pesar de tener un buen grado de correlación para el modelo descrito (98,60%). Además, como se observa en las Tablas 2 y 3, presentan valores teóricos en el equilibrio bastante lejanos de los experimentales (Honeycomb (24,74%) y Disco (134,05%) respectivamente).

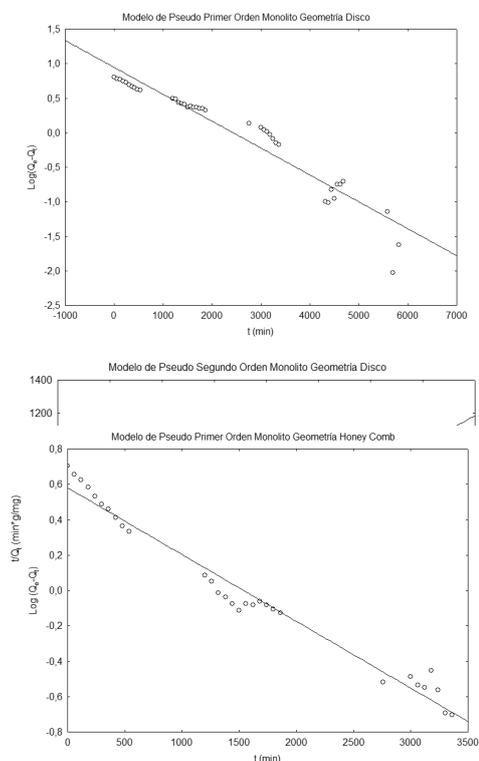


Figura 3. Correlación teórica lineal de los datos obtenidos para el modelo cinético de pseudo primer orden, geometrías disco y honeycomb.

Tabla 1. Consolidado constantes obtenidas para los diferentes modelos de isoterma de adsorción para ambas geometrías.

Modelo Isoterma de adsorción	Freundlich			Langmuir			Temkin			Toth				Redlich Paterson			
	K_f ((mg/g)(L/mg))	n	R^2	$Q_{máx}$ (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	β (J/mol)	α (L/g)	R^2	b_T	n_T	$Q_{máx}$ (mg/g)	R^2	β	K_{sp} (L/g)	a_{sp} (L/mg)	R^2
Honeycomb	8,6254	2,99653	0,9811	27,534	0,2605	0,9709	5,5749	6,4675	0,9463	1,9457	0,2851	67,5012	0,9579	0,000001	0,9531	0,345	0,8580
Disco	10,943	3,6764	0,9893	30,3526	0,2637	0,9803	5,5472	8,3954	0,9577	1,4799	0,358	51,894	0,9603	0,8078	22,6354	1,5238	0,9577

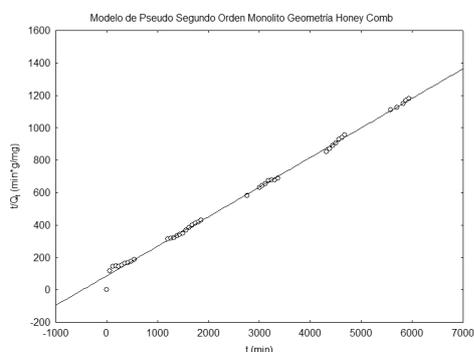


Figura 4. Correlación teórica lineal de los datos obtenidos para el modelo cinético de pseudo segundo orden, geometrías disco y honeycomb.

Observando la tabla 5, se puede observar el alto ajuste del modelo de pseudo segundo orden en la geometría honeycomb (99,87%), además de tener un bajo porcentaje de desviación (Tabla 2) en el valor teórico de la concentración de fenol en el equilibrio por gramo de carbón activado respecto al experimental (8,31%); para la geometría Disco, se puede confirmar que tiene un comportamiento desde las 50 horas con más tendencia al modelo de pseudo segundo orden, siendo reflejado este comportamiento en un bajo coeficiente de correlación (Tabla 5) R^2 (89,14%) y una desviación en el valor teórico de la concentración de fenol en el equilibrio por gramo de carbón activado respecto al experimental (Tabla 3) (23,69%).

Tabla 2. Comparación entre los valores obtenidos experimental y teóricamente para los modelos cinéticos de pseudo primer y pseudo segundo orden para la geometría canal.

Modelo Cinético	Valor Q_e Teórico	Valor Q_e Experimental	% Desviación
Pseudo Primer orden	3,811	5,064	24,74
Pseudo Segundo orden	5,485	5,064	8,310

Tabla 3. Comparación entre los valores obtenidos experimental y teóricamente para los modelos cinéticos de pseudo primer y pseudo segundo orden para la geometría disco.

Modelo Cinético	Valor Q_e Teórico	Valor Q_e Experimental	% Desviación
Pseudo Primer orden	15,101	6,452	134,05
Pseudo Segundo orden	7,9808	6,452	23,69

Ahora, observando los valores calculados para la difusión intrapartícula en las geometrías honeycomb y disco, es válido afirmar que existe relación de este mecanismo difusivo con el proceso de adsorción de los monolitos de carbón activado; cabe anotar, que hay factores externos que no permitieron una mayor transferencia de masa desde la so-

lución a adsorber hacia la superficie carbonosa, debido a la naturaleza del sistema empleado en la experimentación.

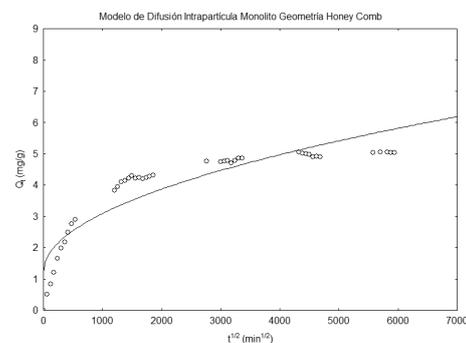
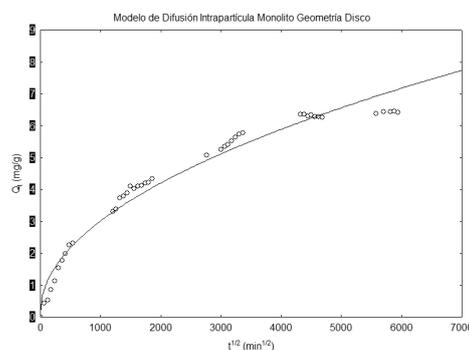


Figura 5. Correlación teórica lineal de los datos obtenidos para el modelo cinético de difusión ultra-partícula, geometrías disco y honeycomb.

Sin embargo, en la geometría disco, se aprecia una buena correlación (R^2) en los datos obtenidos, lo que permitiría concluir una mayor incidencia de la difusión intrapartícula en el fenómeno de adsorción de fenol en soluciones acuosas con monolitos de carbón activado, además, recordando la importancia del parámetro C, es posible afirmar que la geometría disco ofrece mayor transporte del adsorbato a través de la estructura monolítica, ya que su valor (Tabla 4) C (0,1453) es pequeño, lo que facilitaría procesos internos de transferencia del adsorbato y la formación de una capa de adsorbato depositado en la superficie tendría un espesor bastante pequeño; en el caso de los monolitos con geometría Honeycomb, presenta un valor de correlación más pequeño, pero que no permite descartar este fenómeno como parte importante en el proceso de adsorción, respecto a los valores de C y K_f , esta geometría tiene una menor capacidad de difusión de adsorbato entre los poros de la estructura, creando una capa más gruesa ($C=1,2155$) que la geometría Disco; es importante observar que el valor de K_f es mayor en la geometría disco que en la geometría honeycomb, lo que demuestra la eficiencia de la geometría Disco frente a la Honeycomb, ya que, antes de empezar la parte experimental, se creería que por la forma de la estructura honeycomb, presentaría mayores

resultados respecto a la difusividad y adsorción de moléculas, como lo es el fenol en este caso.

Tabla 4. Constantes obtenidas para la difusión intrapartícula en ambas geometrías.

Geometría Monolito	K(mg/(g*min ^{0.5}))	C	R ²
Honeycomb	0,05942	1,2155	0,9140
Disco	0,09078	0,1453	0,9856

Sin embargo a pesar de estos interesantes resultados, la diferencia entre la capacidad de adsorción entre los monolitos tipo disco y honeycomb están relacionados con sus características texturales, es decir con el área superficial y la química.

Tabla 5. Factor de correlación (R²) para las dos (2) geometrías.

Geometría Monolito	Pseudo primer orden	Pseudo segundo orden	Difusión intraparticular
Disco	95,96	89,14	98,56
Honeycomb	98,60	99,87	91,40

CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación, demuestran que el carbón activado obtenido a partir de cáscara de coco, conformado en estructuras rígidas de geometría particular llamadas monolitos, tiene buenas capacidades de adsorción para la remoción de fenol en soluciones acuosas. Los resultados experimentales fueron analizados con los modelos de isoterma de adsorción de Langmuir, Freundlich, Toth, Temkin y Redlich-Paterson, encontrando que todos los modelos presentan un muy buen comportamiento en su factor de correlación (R²) para ambas geometrías (honeycomb y disco), exceptuando el caso de la geometría honeycomb con el modelo Redlich-Paterson. El fenómeno de adsorción es descrito por la formación de monocapa de adsorbato en la superficie del adsorbente, esto se puede afirmar debido a la isoterma tipo Langmuir obtenidas en el manejo de los datos experimentales. El estudio cinético de la adsorción de fenol en soluciones acuosas por parte de monolitos de carbón activado fue llevado a cabo con tres (3) modelos cinéticos: modelo de pseudo primer y modelo de pseudo segundo orden, y el modelo de difusión intrapartícula. Los datos experimentales permiten anotar que la adsorción de fenol presenta un comportamiento acorde al modelo cinético de pseudo segundo orden, con la difusión intrapartícula como uno de los pasos determinantes en el proceso de adsorción. El presente estudio concluye que emplear material de desperdicio como cáscara de coco para la obtención por vía química de carbón activado y sintetizándolo en estructuras rígidas llamadas monolitos, podría ser una alternativa interesante en el desarrollo de adsorbentes de bajo costo para la remoción de sustancias tóxicas como lo es el fenol, que están presentes en aguas de desecho de sectores industriales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al convenio marco establecido entre la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad de

Los Andes (Colombia). Una especial gratitud de los autores por la financiación parcial del Fondo especial "Proyecto Semilla" de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Los Andes, para la realización de ésta investigación.

BIBLIOGRAFIA

1. Min-Woo, Jung.; Kyu-Hong, Ahn.; Yonghun, Lee.; Ki-Pal, Kim.; Jae-Seong, Rhee.; Jung Tae, Park.; Ki-Jung, Paeng. Adsorption characteristics of phenol and chlorophenols on granular activated carbons (GAC). *Microchem J.* 70 (2), 23-131 (2001).
2. Moreno-Castilla, Carlos. Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials. *Carbon.* 42(1), 83-94 (2004).
3. Dabrowski, A.; Podkoscielny, P.; Hubicki, Z.; Barcza, M. Adsorption of phenolic compounds by activated carbon- a critical review. *Chemosphere.* 58(8), 1049-1070 (2005).
4. Haghseresht, F.; Nouri, S.; Finnerty, J.J.; Lu, G.Q. Effects of surface chemistry on aromatic compound adsorption from dilute aqueous solutions by activated carbon. *J. Phys. Chem. B.* 106 (42), 10935-10943 (2002).
5. Febrianto, Jonathan.; Kosasih, Aline Natasia.; Sunarso, Yaka.; Ju, Yi-Hsu.; Indraswati, Nani.; Ismadji, Suryadi. Equilibrium and kinetic studies in adsorption of heavy metals using biosorbent: A summary of recent studies. *J.Hazard. Mater.*162(2-3), 616-645 (2009).
6. El Nemr, Ahmed.; Abdelwahab, Ola.; El-Sikayily, Amany.; Khaled, Azza. Removal of direct blue-86 from aqueous solution by new activated carbon developed from orange peel.. *J. Hazard. Mater.* 161(1), 102-110 (2009).
7. Johnson, Robert D.; Arnold, Frances H. The Temkin isotherm describes heterogeneous protein adsorption. *Biochim Biophys Acta.* 1247(2) 293-297 (1995).
8. Liu, Yu.; Liu, Ya-Juan. Biosorption isotherms, kinetics and thermodynamics. *Separ Purif Tech.* 61(3) 229-242 (2008).
9. Khambhaty, Yasmin.; Mody, Kalpana.; Basha, Shaik.; Jha, Bhavanath. Kinetics, equilibrium and thermodynamic studies on biosorption of hexavalent chromium by dead fungal biomass of marine *Aspergillus niger*. *Chem Eng J.* 145(3), 489-495 (2009).
10. Glimbert, Frédéric.; Morin-Crini, Nadia.; Renault, Francois.; Badot, Pierre-Marie.; Crini, Grégorio. Adsorption isotherm models for dye removal by cationized starch-based material in a single component system: Error analysis. *J Hazard Mater.* 157(1), 34-46 (2008).
11. Hamdaoui, Oualid.; Naffrechoux, Emmanuel. Modeling of adsorption isotherms of phenol and chlorophenols onto granular activated carbon, Part II: Models with more than two parameters. *J Hazard Mater.* 147(1-2), 401-411 (2007).
12. Herrejón Figueroa, Martha L.; Limón Rodríguez, Benjamín. Cinética e isotermas de adsorción de Pb(II) en suelo de Monterrey. *Revista Ingenierías.* 11(41) 24-31 (2008).
13. Moreno-Piraján, Giraldo Liliana. Study of activated carbons by pyrolysis of cassava peel in the presence of chloride zinc. *J. Anal. Appl. Pyrol.* 87(2) 288-290 (2010).