

ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE ADSORCIÓN DE ÍNDIGO CARMÍN EN PIEZAS ABRASIVAS

Alexander P. Vasco^{*†}, Mariluz V. Betancur^{*}

**Grupo de Investigaciones Ambientales; Universidad Pontificia Bolivariana; Cir. 1
#70-01, B11, Medellín*

Recibido 01 Diciembre 2013; aceptado 10 Julio 2014
Disponible en línea: 19 Diciembre 2014

Resumen: En la presente investigación se exploraron las características de adsorción del colorante índigo carmín sobre piezas abrasivas producto de la combustión de cascarilla de arroz. Las pruebas en discontinuo fueron llevadas a cabo para determinar la influencia de los siguientes parámetros: tiempo de contacto, dosis de adsorbente y concentración inicial para la remoción de Índigo Carmín (IC). Las condiciones óptimas fueron encontradas a un tiempo: 5 h y una dosis de adsorbente: 40 g/300mL. Se aplicaron varios modelos cinéticos siendo el modelo de pseudo-segundo orden el que mejor se ajustó a los datos experimentales para la adsorción de IC en piezas abrasivas.

Palabras clave: Colorante Índigo Carmín, cinética de adsorción, piezas abrasivas, ceniza de cascarilla de arroz.

KINETIC STUDIES FOR THE ADSORPTIVE OF INDIGO CARMINE BY ABRASIVE PELLETS

Abstract: The present study explored the adsorptive characteristics of Indigo Carmine dye onto abrasive pellets product of the combustion of rice husk. Batch experiments were carried out to determine the influence of parameters like contact time, adsorbent dose and initial concentration on the removal of indigo carmine (IC). The optimum conditions were found to be time: 5 h and adsorbent dose: 40 g/300mL. Various models were applied where the pseudo-second-order kinetic model represented the adsorption kinetics of IC onto abrasive pellets.

Keywords: Indigo Carmine dye, Adsorption kinetics, abrasive pellets, Rice husk ash.

1. INTRODUCCIÓN

El Índigo Carmín (IC), un colorante sintético de color azul, se utiliza principalmente en la industria textil para el teñido de fibras de poliéster y denim. Se estima que alrededor del 30% de los tintes aplicados no se fijan y se descargan en el efluente. El índigo es un colorante tóxico que puede causar irritaciones en la piel y los ojos, puede dañar la córnea y es cancerígeno ([Khelifi, et al., 2007](#)).

El índigo carmín tiene una persistencia en el ambiente, sus oxidaciones y reducciones parciales pueden generar productos secundarios tóxicos, además de ser resistente a la acción de agentes químicos, luz, calor y es poco degradable. Existen diferentes métodos utilizados para su remoción entre los que se destacan degradación foto-electro catalítica ([Guaraldo & Pulcinelli, 2010](#)), adsorción ([Mittal, et al., 2006](#)) ([M.A, et al., 2007](#)), oxidación con H₂O₂/UV ([Heba, et al., 2008](#)),

[†] Autor al que se le dirige la correspondencia:
Tel. 3206307419.

E-mail: alexander.vasco@alfa.upb.edu.co (Alexander Vasco Pérez).

electrocoagulación ([Secula, 2011](#)), filtración, intercambio iónico, ozonización, fotocatalisis, descomposición aeróbica y anaeróbica por medio de microorganismos, cultivos puros de hongos y bacterias y procesos electroquímicos tales como oxidación electroquímica, reducción electroquímica, entre otros ([Martínez-Huitle & Brillas, 2009](#)).

Técnicas de adsorción con residuos agroindustriales han sido estudiadas por su bajo costo, entre los diferentes estudios que se han realizado para la adsorción de IC se destacan los realizados por Prado y colaboradores en el año 2004 quienes evaluaron su adsorción sobre quitina y quitosano ([Prado, 2004](#)), en el año 2008, Lakshmi y colaboradores estudiaron el proceso de adsorción con ceniza de cascarilla de arroz después de la combustión. Evaluaron la influencia de los parámetros como el pH inicial, tiempo de contacto, la dosis adsorbente y la concentración inicial para la eliminación de índigo carmín.

A nivel industrial el proceso de desgaste de denim se realiza en tómbolas al someter el denim a un lavado con piedra pómez, material de origen volcánico, en el cual los residuos generados de trozos de piedra pómez obstruyen los ductos de vertido de aguas, disponiéndose posteriormente en rellenos sanitarios. El manejo de las descargas del agua residual coloreada genera importantes impactos ambientales y económicos. Con base a lo anterior, en una investigación realizada por el Grupo de Investigaciones Ambientales (GIA) de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) en el año 2009 encontraron un método para fabricar piezas abrasivas elaboradas a partir de la ceniza producto de la transformación termoquímica de la cascarilla de arroz como reemplazo de la piedra pómez encontrándose otra función relacionada con la adsorción del IC.

Los procesos de eliminación de índigo aunque han sido ampliamente estudiados son costosos ya que requieren la implementación de equipos de proceso en algunos casos complejos además de la utilización de reactivos, energía, medidores, personal, entre otros, elevando los costos de producción. Por este motivo las industrias textiles precinden de la utilización de procesos terciarios para la eliminación de colorantes. Es así, como en el desarrollo de la presente investigación se aborda la adsorción de las piezas abrasivas como alternativa para la remoción de este colorante.

El objetivo de esta investigación es encontrar un modelo que describa los datos cinéticos para la adsorción de IC sobre piezas abrasivas, además de la influencia de la dosis de adsorbente (m), tiempo de contacto (t) y concentración inicial (Co).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Piezas abrasivas

El conformado de las piezas abrasivas se realizó siguiendo la metodología descrita en Pineda, T y otros (2006) bajo la patente radicada con el número 83733. Se preparó una mezcla de ceniza de cascarilla de arroz y una solución de silicato de sodio para consolidar las piezas. La ceniza de cascarilla de arroz se obtuvo mediante un tratamiento termoquímico de la cascarilla de arroz en un reactor de lecho fluidizado diseñado por investigadores del GIA, su composición química se muestra en [Tabla 1](#). Antes del conformado manual de las piezas, la masa final se homogeneizó pasándola por una malla a fin de evitar puntos con mayor concentración de silicato en la pieza.

Tabla 1. Caracterización de la pieza abrasiva

Elemento	%W
SiO ₂	86.1
K ₂ O	1.2
P ₂ O ₅	0.5
MgO	0.1
CaO	0.3
Al ₂ O ₃	0.5
MnO	0.2
Fe ₂ O ₃	0.1
Na ₂ O	9.7
SO ₃	0.3
Cl	0.1
Pérdidas por ignición	1

Posteriormente, fueron sometidas a cocción a una temperatura mayor a 700 °C durante un tiempo determinado, temperatura a la cual comienza la vitrificación del silicato ([Pineda et al, 2006](#)). El horno usado consta de resistencias eléctricas, modelo D8 serie 1546 marca Terrígeno con temperatura máxima de 1200 °C.

2.2. Adsorbato

El adsorbato usado es colorante índigo carmín C.I.: 73015, fórmula molecular: $C_{16}H_8N_2O_8S_2Na_2$, MW: 466.35, colorante aniónico (Khelifi, et al., 2007).

2.3. Estandarización del Índigo Carmín

Las lecturas de los estándares y de las concentraciones de color fueron realizadas en un equipo de espectrofotometría UV/VIS Termo, modelo Génesis 6.

Se construyó una curva de calibración del índigo carmín, realizándose un barrido para determinar la longitud de onda apropiada para la curva de calibración, la cual fue de 705 nm, se prepararon 20 estándares a partir de una solución madre a una concentración de 500 mg/L y se realizaron diluciones no mayores de 1/10.

Se pesaron 0.5 g del colorante índigo carmín los cuales se llevaron a una estufa de laboratorio a 105 °C hasta alcanzar un peso constante, esta cantidad se dejó en agitación en un shaker rotatorio marca Heidolph, modelo Unimax 1010 una velocidad constante de 180 rpm por 24 horas en agua para obtener una completa solubilización.

2.4. Experimentación en discontinuo

Los experimentos en discontinuo fueron realizados en un *shaker* a 298 ± 1 K para evaluar el efecto de los parámetros m , Co y t . Cada una de las corridas experimentales se realizó en *beakers* de 1 L que contenían 300 mL de solución de índigo carmín con una concentración y una dosis de adsorbente conocida. Todos los ensayos se realizaron a 150 rpm a una temperatura constante de 298 ± 3 K y todas las muestras fueron centrifugadas a 4000 rpm en un equipo marca Boeco Germany U320 por 10 min después del proceso de adsorción para remover las partículas de sólidos suspendidos generadas por las piezas abrasivas en la solución, el líquido sobrenadante fue analizado para determinar la concentración residual de colorante en las muestras.

Para determinar la dosis óptima de adsorbente, 300 mL de solución de IC se pusieron en contacto con diferentes dosis de adsorbente entre 3 g y 70 g, con una Co : 50 mg/L durante un tiempo de 5 h.

Mientras que la cinética de adsorción fue determinada analizando la capacidad de adsorción de las piezas en una solución acuosa de colorante a diferentes intervalos de tiempo de contacto entre 5 minutos y 900 min, a una Co : 50 mg/L y 75 mg/L. Se llevaron a cabo triplicados de todas las experiencias, resultando la diferencia entre éstos, menor al 3%. Los resultados se informan empleando los valores promedio.

La pieza fue caracterizada a partir de la determinación de las isothermas de adsorción de N_2 utilizando un equipo Nova 3200 (Quantachrome), así como, el programa Autosorb para establecer las correlaciones correspondientes. Para el cálculo del área superficial se utilizó el método *MULTIPOINT BET*.

El pH se controló usando un pHmetro modelo Orion 9107 WP al comienzo, durante y al final de cada ensayo observándose un incremento del pH durante los primeros 10 minutos pasando de 6.5 hasta alcanzar un pH de 11 y mantenerse estable hasta el final del proceso, lo cual puede ser debido a la hidrólisis de la ceniza de cascarilla de arroz generando cationes básicos en la solución, la cual tiene una capacidad de amortiguación, taponamiento o buffer en la solución ([Lakshmi, et al., 2008](#)) ([Dimitrova & Mehandgiev, 1998](#)) ([Kwon, et al., 2005](#)).

La determinación del porcentaje de remoción de color se realizó utilizando la ecuación (1) ([Kumar, et al., 2007](#)):

$$\% \text{ reducción y remoción de color} = \left(\frac{C_i - C_o}{C_o} * 100 \right) \quad (1)$$

Dónde: C_i = Concentración final o residual del colorante y C_o = Concentración inicial del colorante

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Efecto de la dosis de adsorbente (m)

El efecto de m en la remoción de IC por parte de las piezas abrasivas en un tiempo de 5 h se muestra en la [Fig. 1](#).

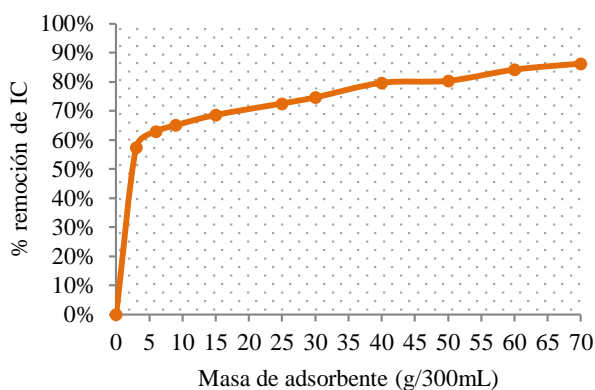


Fig. 1. Efecto de la dosis de adsorbente sobre la remoción de IC para la pieza abrasiva (Co: 50 mg/L, pH: 6.89, t: 5 h, T: 298.15 K)

A medida que aumenta la dosis se observa un mayor porcentaje de adsorción y como la remoción de IC aumenta hasta cierto límite y a partir de la dosis 40 g/300mL presenta tendencia al equilibrio. El aumento en el porcentaje de adsorción a medida que se aumenta m se podría atribuir a una mayor área superficial y a la disponibilidad de más sitios de adsorción (Venkat, et al., 2006). A valores inferiores a 30 g/300mL la superficie de las piezas se satura con IC generando una concentración residual grande; mientras que a valores superiores a 40 g/300mL la eliminación de IC se estabiliza al obtener un equilibrio entre la concentración de IC en la superficie con la concentración de IC en la solución (Venkat, et al., 2006) en consecuencia la dosis óptima m fue encontrada a 40 g/300mL. Lakshmi y colaboradores reportan una m de 10 g/L para la adsorción de índigo carmín sobre ceniza de cascarilla de arroz (RHA) a Co: 50 mg/L, T 30 °C t=4 h, esta menor dosis fue posible por Lakshmi al no aglomerar la RHA lo que se traduce en una mayor área superficial disponible (Lakshmi, et al., 2008), mientras que en la presente experimentación las partículas de RHA fueron aglomeradas para obtener las piezas abrasivas.

3.2. Efecto de la concentración inicial de adsorbente y tiempo de contacto

Las curvas de tiempo de contacto se presentan en la Fig. 2, mostrando una rápida adsorción durante los primeros 50 min, después la rata de adsorción decrece gradualmente, alcanzando el equilibrio aproximadamente a las 5 h (tiempo de contacto óptimo). Para el tiempo de contacto de 15 h se

observa que la remoción de IC aumenta ligeramente su remoción en un 1% respecto al tiempo de contacto óptimo. La agregación de moléculas de colorante con el aumento del tiempo de contacto hace que sea casi imposible que las moléculas de colorante se difundan con mayor profundidad en la estructura adsorbente específicamente en los sitios de más alta energía. Esta agregación anula la influencia del tiempo de contacto ya que los mesoporos se saturan y comienzan a generar resistencia a la difusión de moléculas agregadas de colorante en el adsorbente (Lakshmi, et al., 2008) (Venkat, et al., 2006).

Esta podría ser la razón por la cual se dio un incremento leve en la adsorción a las 15 h. Dado que la diferencia en los valores de adsorción en 5 h de contacto y a las 15 h era muy pequeña, es así como después de 5 h de contacto, se asumió una aproximación de estado estacionario y un estado de cuasi-equilibrio fue aceptado. La curva es suave y continua llevando a la saturación indicando una posible cobertura de la monocapa en la superficie de las piezas por las moléculas de IC (Lakshmi, et al., 2008) (Venkat, et al., 2006) (Vieira, et al., 2012). La curva cinética de adsorción de IC para piezas abrasivas se presenta en la Fig. 3, donde se puede observar la comparación entre los datos experimentales y los predichos a partir del modelo pseudo segundo orden a dos concentraciones diferentes de IC Co=50 y 75 mg/L.

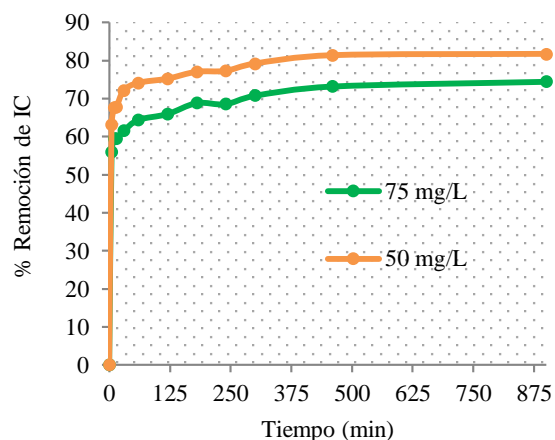


Fig. 2. Efecto del tiempo de contacto en la adsorción de IC (Co: 50 y 75 mg/L, pH: 6.8, Dosis: 40 g/300mL, T: 298.15 K)

En la Fig. 3 se presenta (qt) la cantidad instantánea de IC adsorbido por unidad de masa de la muestra en función de t, para una concentración inicial de

IC sometida a las siguientes condiciones: temperatura de 25 °C, un pH inicial de 6.8, velocidad de agitación de 150 rpm y una dosis de 40 g/300 mL.

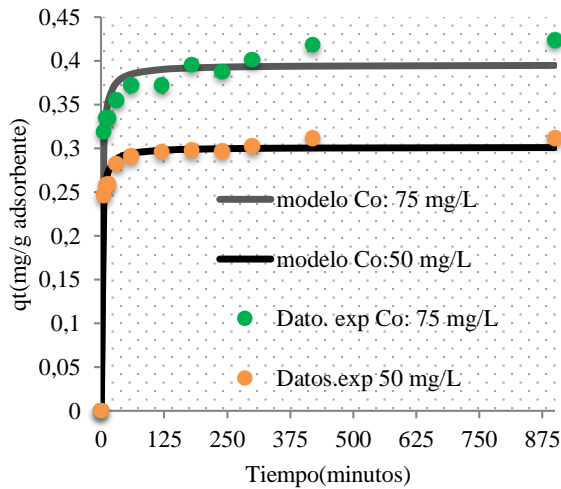


Fig. 3. Cinética de adsorción Pseudo-segundo orden graficada para la remoción de IC Co: 50 y 75 mg/L (m: 40 g/300mL, pHo: 6.8 T: 298.15 K)

También se puede apreciar que q_t aumentó con la C_o , aunque el porcentaje de remoción disminuyó con el incremento de la C_o . El q_t aumenta con C_o ya que la resistencia a la adsorción disminuye con el aumento de la concentración de IC y la razón de adsorción se incrementa con la C_o debido a un aumento en la fuerza motriz (Venkat, et al., 2006).

3.3. Estudio cinético de adsorción

A continuación se presentan los modelos aplicados para el estudio cinético de la investigación.

3.3.1. Modelo de pseudo-primer orden

Los datos experimentales de un proceso de adsorción pueden ajustarse al modelo cinético propuesto por Lagergren (1898), conocido como cinética de pseudo-primer orden y que, en su forma lineal, se representa por la ecuación (Lagergren, 1898):

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2)$$

Donde q_e es la cantidad de soluto adsorbido en el equilibrio por unidad de masa del adsorbente (mg g^{-1}), q es la cantidad de soluto adsorbido a un tiempo t , k_1 es la constante de velocidad de pseudo primer orden (min^{-1}), y t es el tiempo de contacto (min). Cuando $q = 0$ a $t = 0$ se integra la 3 (Lagergren, 1898):

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (3)$$

La constante de velocidad k_1 puede ser calculada a partir de la gráfica $\log(q_e - q)$ contra t para diferentes parámetros de adsorción como el pH, temperatura, concentración del adsorbato, dosis del adsorbente, tamaño de partícula.

Al aplicar este modelo se obtuvo un coeficiente de determinación r^2 muy bajo tan solo de 0.56 lo que indica que los datos experimentales no se ajustaron a este modelo.

3.3.2. Modelo de pseudo-segundo orden

Con el fin de investigar la adsorción de IC sobre piezas abrasivas también se aplicó un modelo de pseudo-segundo orden (Porter, J & McKay, 1999) representado como:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_s(q_e - q_t)^2 \quad (4)$$

Donde K_s es la constante de pseudo-segundo orden en g/mg min , q_e es la capacidad de adsorción en equilibrio en mg/g integrando la (4) e indicando que $q_t=0$ cuando $t=0$ se obtiene la siguiente ecuación:

$$q_t = \left(\frac{tk_s q_e^2}{1 + tk_s q_e} \right) \quad (5)$$

Reorganizando queda:

$$q_t = \left(\frac{t}{\frac{1}{k_s q_e^2} + \frac{t}{q_e}} \right) \quad (6)$$

q_e se obtuvo al realizar una regresión no-lineal donde las variables optimizadas fueron k_s y q_e como se muestra en la Fig. 3.

Los valores de $q_{e,exp}$ y el $q_{e,cal}$ de los modelos de pseudo-segundo orden se muestran en la [Tabla 2](#).

Los valores de q_e y q_t son muy cercanos, lo cual se ve reflejado en un coeficiente de determinación cercano a 1, por este motivo el modelo se ajusta adecuadamente a los datos experimentales obtenidos. Lo que supone que el adsorbato se adsorbe en 2 sitios activos de las piezas ([Porter, J & McKay, 1999](#)).

También se puede apreciar (ver [Fig.3](#)) que la cantidad de IC adsorbida por unidad de masa de adsorbente (q_t) aumento con la C_o , aunque el porcentaje de remoción disminuyó con el aumento de la C_o . El q_t aumento con el aumento de la C_o ya que la resistencia a la adsorción disminuye con el aumento de la concentración de IC y la rata de adsorción aumenta con la C_o debido al aumento en la fuerza motriz ([Venkat, et al., 2006](#)).

Tabla 2. Parámetros cinéticos para la remoción de IC, T: 298.15°C, t: 5h, C_o : 50-75mg/L, m: 40g/300mL

Modelo de Pseudo-segundo-Orden					
C_o (mg L ⁻¹)	$q_{e,exp}$ (mg g ⁻¹)	h (mg g ⁻¹ min ⁻¹)	K_s (g mg ⁻¹ min ⁻¹)		R^2
50	0,3017	0,2089	2,2939		0,9909
75	0,3960	0,2393	1,5268		0,9757
Modelo W-M Intrapartícula difusión					
C_o (mg L ⁻¹)	K_{idI} (mg g ⁻¹ min ^{-1/2})	K_{idII} (mg g ⁻¹ min ^{-1/2})	I_I (mg g ⁻¹)	I_{II} (mg g ⁻¹)	R^2
50	0,01070	0,00099	0,2221	0,2850	0,9824
75	0,01059	0,00259	0,2967	0,3532	0,9652
Modelo Bangham					
C_o (mg L ⁻¹)	K_0 (g)		A		R^2
50	1,4980		0,05418		0,9586
75	1,2445		0,06400		0,9788

3.3.3. Modelos de difusión intrapartícula

El modelo cinético de difusión intraparticular diseñado por Weber y Morris (1963) es, como su nombre indica, un modelo cinético basado en la difusión del adsorbato hasta penetrar en el adsorbente.

La ecuación Weber y Morris es la que rige el proceso ([Morris & Weber Jr., 1963](#))

$$q_t = k_i t^{0.5} + I \quad (7)$$

Según Weber y Morris, si la difusión intraparticular es el paso limitante de velocidad del proceso, la representación gráfica del adsorbato retenido frente a la raíz cuadrada del tiempo de contacto ($t^{0.5}$) debería dar una línea recta, que

pasará por el origen de coordenadas cuando la difusión intraparticular sea el único paso limitante de velocidad del proceso en la eliminación del adsorbato. ([Morris & Weber Jr., 1963](#)) ([Venkat, et al., 2006](#))

Se pueden obtener dos regiones, la primera región lineal es atribuida a la difusión en la superficie o seno del fluido y la segunda región lineal a la difusión en la intrapartícula, ([Allen, et al., 1989](#)) la divergencia en el valor de pendiente de 0,5 indica la presencia del proceso de difusión en la intrapartícula como uno de los pasos limitantes de la velocidad, sin embargo muchos otros procesos controlan la velocidad de adsorción, todos ellos pueden estar operando simultáneamente ([Kannan & Sundaram, 2001](#)). En la [Fig. 4](#) se presenta el modelamiento de los datos experimentales con el modelo donde se gráfica q_t frente al $t^{0.5}$ el cual consiste en dos tramos lineales de diferentes

pendientes, lo que ocurrió para las 2 concentraciones de IC sobre las piezas abrasivas.

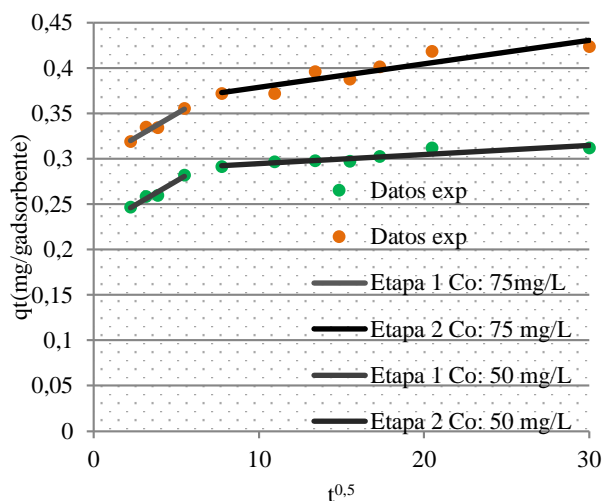


Fig. 4. Cinética de adsorción en la intrapartícula graficada para la remoción de IC Co: 50 y 75 mg/L (m: 40 g/300 mL, pHo: 6.8 T: 298.15 K)

La desviación de la línea con respecto al origen de coordenadas (I) puede ser atribuida a la diferencia de velocidad de transferencia de materia en las etapas iniciales y finales de la adsorción (Dogan & Alkan, 2003). Sin embargo, la multilinealidad indica que están ocurriendo varias etapas que condicionan la cinética del proceso de adsorción, que deben ser analizadas independientemente. La interpretación de estas regiones es confusa en la bibliografía ya que diferentes autores responden de manera diferente a este fenómeno, Dogan y otros atribuyen la parte inicial de la curva a la difusión en los macroporos (Dogan & Alkan, 2003) (Gulipalli, et al., 2011) (Lakshmi, et al., 2008) y Kumar y otros explican que dicha parte informa de la difusión en la capa límite (Kumar & Porkodi, 2007) (Srivastava, et al., 2006) (Venkat, et al., 2006) (Cheung, et al., 2007).

La etapa I corresponde a la adsorción en la superficie externa de las piezas, incluyendo los macroporos y mesoporos, hasta que esta superficie externa alcanza la saturación. A partir de ese momento, el colorante empieza a penetrar a los poros menos accesibles, los microporos, de manera que la resistencia a la difusión aumenta, disminuyendo la velocidad de difusión (Cheung, et al., 2007). Por tanto, $k_{idI} > k_{idII}$ para un Co: 50 mg/L $0,0107 > 0,00099$ y para Co: 75 mg/L $0,0114 > 0,0026$ lo que significa que conforme se hace menor el recorrido libre disponible para la

difusión, con el bloqueo adicional de algunos poros, se reduce la magnitud de los parámetros de difusión (Cheung, et al., 2007)

La etapa II corresponde a la difusión en los microporos, la verdadera difusión interna. K_{id} aumenta al disminuir el tamaño de partícula y al aumentar la dosis de adsorbente ya que ambos factores determinan un aumento de la superficie externa disponible (Cheung, et al., 2007) (Lakshmi, et al., 2008).

Estos resultados coinciden con los publicados por Lakshmi y otros, Srivastava y otros, Mane y otros y Mateos para la remoción de IC y de otros colorantes sobre ceniza de cascarilla de arroz donde se observan dos etapas que probablemente controlan el proceso de adsorción (Mestanza Mateos, 2012). La intersección con el eje de ordenadas (I) refleja el efecto que la capa límite tiene sobre la adsorción del IC. Cuanto más grande sea este punto de intersección, mayor será la contribución de la adsorción superficial como paso limitante del proceso; es decir, la medida del espesor de la capa límite siendo el área superficial la variable que difiere entre Lakshmi cuya área superficial es de $36 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (Mestanza Mateos, 2012) (Lakshmi, et al., 2008) (Venkat, et al., 2006) y las piezas abrasivas de la presente investigación las cuales poseen un área superficial de $8.36 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ según el método de BET.

3.3.4. Modelo cinético Bangham

La ecuación de Bangham se representa de la siguiente manera:

$$\log\left(\frac{C_0}{C_0 - q_t m}\right) = \log\left(\frac{k_0 m}{2.303V}\right) + \alpha \log(t) \quad (8)$$

Donde V es el volumen de la solución (mL), C_0 la concentración inicial (mg/L), m es la masa de adsorbente por litro de solución (g/L), q_t es la masa de adsorbato retenida en un tiempo t (mg/g) y α (<1) y K_0 son constantes. Si el doble logaritmo puede modelar los datos experimentales significa que la difusión del adsorbato en los poros del adsorbente es la fase que controla la velocidad de adsorción (Tütem, et al., 1998). En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos para el modelo cinético de Bangham.

Es así, como se puede decir que los modelos aplicados describen satisfactoriamente la cinética de adsorción del IC en las piezas abrasivas de acuerdo con los valores de la correlación obtenidos. Aunque el modelo de Bangham ofrece una buena aproximación al igual que el modelo de W-M, el modelo de pseudo-segundo orden fue el que mejor se ajustó a los datos experimentales siendo el coeficiente de determinación el más cercano a 1 (ver [Tabla 2](#)).

4. CONCLUSIONES

Con base a los resultados obtenidos el estudio muestra que las piezas abrasivas adsorben índigo carmín logrando remociones de hasta 81%.

Se obtuvo una dosis óptima de 40 g/300mL a una Co: 50 mg/L. Los porcentajes de remoción más altos obtenidos de IC sobre las piezas abrasivas fue posible para las pruebas realizadas a una Co: 50 mg/L. En el estudio cinético se encontró que el equilibrio entre el adsorbato en la solución y la superficie del adsorbente fue alcanzado a las 5 h. El modelo que mejor se ajustó a los datos experimentales fue el de pseudo-segundo orden obteniéndose un coeficiente de determinación de 0.99.

AGRADECIMIENTO

Los autores están agradecidos con Colciencias por el apoyo ofrecido como joven investigador e innovador 2012 y a la Universidad Pontificia Bolivariana por el soporte técnico y económico en el desarrollo del proyecto.

REFERENCIAS

Allen, S., K. McKay y K. Khader (1989). Intraparticle diffusion of a basic dye during adsorption onto sphagnum peat. *Environmental Pollution*, 39-50.

Cheung, W., Y. Szeto, Y. McKay (2007). Intraparticle diffusion processes during acid dye adsorption onto chitosan. *Bioresource Technology*, 2897-2904.

Dimitrova, S. y D. Mehandgiev (1998). Lead removal from aqueous solutions by granulated blast-furnace slag. *Water Research*, 3289-3292.

Dogan, M. y M. Alkan, 2003. Adsorption kinetics of methyl violet onto perlite. *Chemosphere*, 517-528.

Guaraldo, T. S. Pulcinelli (2010). Influence of particle size on the photoactivity of Ti/TiO₂, 59-266.

Gulipalli, C., B. Prasad y L. Wasewar (2011). batch study, equilibrium and kinetics of adsorption of selenium using rice husk ash (rha). *Journal of Engineering Science and Technology*, 586 - 605.

Heba, A., A. Ashraf, A. Anwer y I. Ibrahim (2008). Treatment of textile waste water using H₂O₂/Uv system, **42**, 17-28.

Kannan, K. y M. Sundaram (2001). Kinetics and mechanism of removal of methylene blue by adsorption on various carbons—a comparative study. *Dyes and Pigments*, 51, 25-40.

Khelifi, E. y otros (2007). Aerobic decolourization of the indigo dye-containing textile. Issue 152.

Kumar. K y K. Porkodi (2007). Mass transfer, kinetics and equilibrium studies for the biosorption of methylene blue using Paspalum notatum. *Journal of Hazardous Materials*, 214-226.

Kumar, P., B. Prasad, I. Mishra y S. Chand (2007). Treatment of composite wastewater of a cotton textile mill. *Journal of Hazardous Materials*, 770-779.

Kwon, J.-S. y otros (2005). Sorption of Zn(II) in aqueous solutions by scoria. *Chemosphere*, 1416-1426.

Lagergren. S (1898). About the theory of so-called adsorption of soluble substances. *kungliga svenska vetenskapsakademiens, Handlingar*, 1-39.

Lakshmi, U., R. Srivastava, V. C., I.D. Mall y D. Lataye (2008). Rice husk ash as an effective adsorbent: Evaluation of adsorptive. *Journal of Environmental Management*.

M.A, S. y otros (2007). Numerical study of the adsorption of dyes from textile effluents, **32**, 1711-1718.

Martínez-Huitle, E. Brillas (2009). Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review, **87**.

Mestanza M. (2012). *Estudio de materiales adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes*, Madrid: s.n.

Mittal, A., J. Mittal y L. Kurup (2006). Batch and bulk removal of hazardous dye, indigo carmine. 591-602.

- Morris, J. y Jr.W. Weber (1963). Kinetics of adsorption on carbon from solution. *ASCE* 89 (SA2), 31e59.
- Pineda et al (2006). *Desarrollo de pellets abrasivos a partir de ceniza producto de la transformación termoquímica de cascarilla de arroz en reactor de lecho fluidizado*, s.l.: Proyecto Colciencias, Código 121032718494, Contrato No. 323.
- Porter, J, F. y G. McKay (1999). The prediction of sorption from a binary mixture of acidic dyes using single- and mixed isotherm variants of the ideal adsorbed solute theory.. *Chemical Engineering Science*, **54**, 5863–5885.
- Prado, A. G. (2004). Comparative adsorption studies of indigo carmine dye on chitin. *Journal of Colloid and Interface Science*.
- Secula, M. (2011). An experimental study of indigo carmine removal from aqueous solution by electrocoagulation. agosto, **277**, 227-235.
- Srivastava, V. C., I.D. Mall y I.M. Mishra (2006). Characterization of mesoporous rice husk ash (RHA) and adsorption kinetics of metal ions from aqueous solution onto RHA. *Journal of Hazardous Materials*, 257–267.
- Tütem, E., R. Apak y C.F. Ünal (1998). Adsorptive removal of chlorophenols from water by bituminous shale. *Water Research*, 2315–2324.
- Venkat, M., D. Indra y S.V. Chandra (2006). Kinetic and equilibrium isotherm studies for the adsorptive removal of Brilliant Green dye from aqueous solution by rice husk ash. *Journal of Environmental Management*, 390–400.
- Vieira, M. G. A., A. F. Almeida Neto, C. da Silva, y C.C. Nóbrega (2012). characterization and use of in natura and calcined rice husks for biosorption of heavy metals ions from aqueous effluents. *Brazilian Journal of chemical engineering*, 619 - 633.

SOBRE LOS AUTORES

Alexander Vasco Pérez

Estudiante de Ingeniería Química, Joven investigador Colciencias (2012), integrante del Grupo de Investigaciones Ambientales.

Mariluz Betancur

Ingeniería Química (2000), MSc. en Ing. y Especialista en Ingeniería Ambiental, Doctorado en Ingeniería. Jefe de Línea de Gestión y Valorización de Residuos – GIA-UPB, Profesora Titular de la Escuela de Ingenierías de la Universidad Pontificia Bolivariana.