

Adsorption and ion exchange of the sugar cane bagasse in the treatment of industrial effluents. II.- Kinetics studies

N. Alastre, N. Fernández y C. García

*División de Postgrado
Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia*

Abstract

The increasing use of non-biodegradable, synthetic detergents, such as Alquil Benzil Sulfonate (ABS), cause significant contamination of the water supply. The removal of these complex substances is necessary, as they give rise to serious problems in water treatment. Adsorption processes represent one effective way to significantly reduce these compounds. The study of adsorption system kinetics is necessary in order to design contact equipment. Activated coal as an adsorbent produces effluents of high quality but at a high cost. The adsorptive capacity of sugar cane bagasse, a waste product of the sugar industry, has been studied with respect to ABS. These results have been reported in another publication.

This research work presents a study of ABS adsorption kinetics on sugar cane bagasse. An analysis is included of the adsorption mechanism and the effects of initial concentrations of ABS, particle size of the bagasse and temperature. According to the results, the adsorption rate of the Bagasse-ABS system is controlled both by external mass transfer and by intraparticle diffusion in operating conditions. Additionally, it was found that if initial ABS concentration decreases, the time necessary to approach equilibrium conditions was shorter. It was also found that reduction of particle size and temperature increased the adsorption rate.

Key words: Adsorption, sugar cane bagasse, mass transport, Alquil Benzil Sulfonate.

Adsorción e intercambio iónico del bagazo de la caña de azúcar en el tratamiento de efluentes industriales. II.- Estudios de Cinética

Resumen

El uso creciente de los detergentes sintéticos, difícilmente biodegradables, tales como el Sulfonato de Alquil Benceno (ABS), provocan inconvenientes de contaminación muy significativos en las aguas de los abastecimientos. La remoción de estos complejos es necesaria puesto que ocasionan problemas graves en el tratamiento de las aguas. Una forma efectiva de lograr una reducción apreciable de estos compuestos es mediante los procesos de adsorción. Para realizar el diseño de los equipos de contacto, es necesario estudiar la cinética del sistema de adsorción en particular. El carbón activado es un adsorbente que produce efluentes de alta calidad, pero a un costo muy elevado. La capacidad adsorptiva del bagazo de la caña de azúcar, un material de desecho de la industria azucarera, con respecto al ABS, ha sido estudiada y los resultados han sido reportados con anterioridad.

Este trabajo presenta un estudio de la cinética de adsorción de ABS sobre el bagazo de la caña de azúcar, que comprende un análisis del mecanismo de adsorción y del efecto de la concentración inicial de ABS, tamaño de partícula de bagazo y temperatura.

De acuerdo con el análisis de los resultados, la velocidad de adsorción del sistema Bagazo-ABS es controlada tanto por la transferencia de masa externa como por la difusión intraparticular, a las condiciones estudiadas. Se encontró, además, que a medida que la concentración inicial de ABS disminuía, menor era el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio. Asimismo, se observó un incremento en la tasa de adsorción cuando el tamaño de partícula era menor y también cuando disminuía la temperatura.

Palabras claves: Adsorción, bagazo de caña, transporte de masa, Alquil Benceno Sulfonatos.

Introducción

La producción y uso creciente de detergentes sintéticos, tales como el Sulfonato de Alquil Benceno (ABS), difícilmente biodegradable, viene ocasionando inconvenientes de contaminación bastante significativos en las aguas de algunos abastecimientos y fuentes. Estos complejos requieren ser removidos puesto que generan graves problemas en el tratamiento de las aguas, tales como: obstaculizar la remoción completa de sustancias que deterioran la calidad del agua, proporcionando olor y sabor desagradable a las aguas tratadas, disminuyendo la absorción de oxígeno en las aguas de los ríos, dificultando así la autopurificación de los mismos, etc. Todo esto ha motivado a que se trate de desarrollar métodos que permitan una reducción más o menos apreciable de estos compuestos.

La adsorción es uno de los procesos más importantes en el control de calidad de las aguas y su aplicación es muy efectiva en la remoción de contaminantes orgánicos de las aguas potables y en el tratamiento de aguas residuales para ser reusadas [1]. En la práctica, la adsorción de compuestos orgánicos es realizada, sobre carbón activado, a través de adsorbedores por carga o continuos. Para lograr el diseño de estos equipos de contacto es necesario realizar ensayos experimentales con el propósito de establecer el modelo de transferencia de masa que describa, en forma más acertada, la cinética del sistema de adsorción en particular.

La adsorción de Sulfonatos de Alquil Benceno sobre carbón activado ha sido estudiada por algunos investigadores [2,3]. El carbón activado es un adsorbente que produce efluentes de alta

calidad pero a un costo muy elevado, por lo que resultaría beneficiosa la utilización de un material adsorbente de bajo costo. El bagazo de la caña de azúcar, un material de desecho de la industria azucarera, presenta propiedades adsorptivas y puede ser utilizado satisfactoriamente en la remoción de tintas [4]. La capacidad de adsorción del bagazo de caña con respecto al ABS ha sido estudiada obteniéndose porcentajes de remoción hasta de 69% para bagazo entero y de 66% para la pulpa a concentraciones de 500 ppm de soluto. Esta remoción se realiza en forma rápida, con un tiempo de contacto máximo de 1 hora para alcanzar el equilibrio. Las isotermas de adsorción fueron analizadas a través de los modelos de Langmuir y de Freundlich [5], encontrándose una buena adaptación de la data experimental con respecto a las isotermas teóricas. Este trabajo presenta un estudio de la cinética de adsorción de ABS sobre el bagazo de la caña de azúcar que comprende un análisis del mecanismo de adsorción y del efecto de la concentración inicial de ABS en solución, tamaño de partícula de bagazo y temperatura, a fin de establecer el modelo de adsorción más adecuado al proceso y determinar los coeficientes de transferencia de masa, de interés en el diseño de equipos.

Metodología

El Sulfonato de Alquil Benceno (ABS) utilizado contenía un 46% de pureza y las soluciones fueron preparadas adicionando agua destilada a una cantidad determinada de ABS hasta alcanzar la concentración deseada, en cada caso. El bagazo, utilizado como adsorbente, era prove-

niente de la Facultad de Agronomía de la UCV, en Maracay, Edo. Aragua, y fue estudiado en su forma entera, con la denominación de Bagazo Entero B, y como pulpa, denominándose Bagazo Pulpa B, a fin de evaluar las posibles diferencias entre ambas formas. Características fisicoquímicas, así como detalles de la preparación de estas muestras, han sido reportadas con anterioridad [5]. Los ensayos se realizaron por carga y mediante la agitación constante y uniforme de 100 rpm con muestras de 1.0 g. de bagazo en contacto con 50 ml. de la solución de ABS, y a las temperaturas de 28°C (temperatura ambiente), 40 y 60°C. Para muestras de Bagazo Pulpa B, se seleccionaron soluciones de concentración 50, 100 y 500 ppm de ABS y un tamaño de partícula de -30+40 mesh; realizándose, además, experiencias con partículas de tamaño -50+60 mesh, para la concentración de 100 ppm de ABS. Con muestras de Bagazo Entero B se realizaron ensayos para la concentración de 100 ppm de ABS, para los dos tamaños de partícula mencionados y a las mismas condiciones de agitación, temperatura, masa de bagazo y volumen de solución. Las concentraciones de ABS en solución fueron medidas para tiempos de contacto de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 minutos, en cada caso. Las determinaciones de la concentración de ABS en solución se realizaron mediante el Método del Azul de Metileno [6], efectuándose las lecturas espectrométricas a una longitud de onda de 650 nm., en un Spectronic 20D de la Milton Roy Company y las concentraciones de ABS determinadas a través de una curva de calibración. Los ensayos se realizaron mediante la utilización de un equipo de agitación mecánica de brazos, marca Burrel, Modelo 75, con control de velocidad de agitación y de tiempo, en el cual se colocaban tubos de vidrio, debidamente sellados, que contenían la solución y el adsorbente. Para los ensayos a temperaturas distintas a la del ambiente se utilizó un baño de María, con control de temperatura.

Resultados y Discusión

Los procesos de adsorción pueden ser interpretados por mecanismos difusionales y/o convectivos de transferencia de masa. El control

de la cinética de adsorción, dependiendo de las condiciones operacionales, puede residir en la solución externa (control de película), en la fase sólida (control de partícula) o en una combinación de esas dos resistencias. Estudios realizados al respecto [7] demuestran que, en los sistemas discontinuos con agitación suficiente, la difusión del adsorbato a través de la partícula controla el proceso de adsorción, ya que, debido a la agitación, el soluto alcanza rápidamente la superficie del sólido para luego difundir lentamente a través del mismo. Estos estudios están basados en el uso del carbón activado como adsorbente, el cual está constituido, fundamentalmente, por microporos de gran longitud; por lo cual se justifica una difusión intraparticular lenta. Por otra parte, la estructura porosa del bagazo parece estar formada, básicamente por macroporos, que le proporcionan un área superficial pequeña [5]. De acuerdo con esto, resulta lógico suponer que la difusión del adsorbato a través de la partícula de bagazo debe ser rápida y con una velocidad comparable a la velocidad de la difusión del mismo a través de la fase líquida, en un sistema discontinuo con agitación, por lo que el Modelo de Doble Resistencia podría resultar adecuado para el proceso. Esto se corresponde con estudios realizados por McKay [8] en la adsorción de tintas sobre pulpa de bagazo, donde la aplicación de un modelo de doble resistencia resulta exitoso para describir la cinética de los sistemas, luego de comprobar que modelos de transporte de masa basados en una transferencia de masa externa o en una difusión intraparticular, solamente, presentaron un éxito limitado cuando se utilizaron para correlacionar los resultados experimentales. A continuación se presenta un análisis de la data de cinética del sistema Bagazo - ABS [9] a fin de establecer, en forma definitiva, la o las etapas que controlan el proceso.

La Fig. 1 muestra el efecto del tiempo de contacto sobre la adsorción del ABS, para el Bagazo Pulpa B, a 28°C y para un diámetro de partícula de -30+40 mesh. Puede apreciarse que la tasa de adsorción aumenta con el tiempo de contacto; sin embargo, esto sólo es apreciable durante los primeros 10 minutos, es decir, que el proceso neto de transferencia de masa ocurre

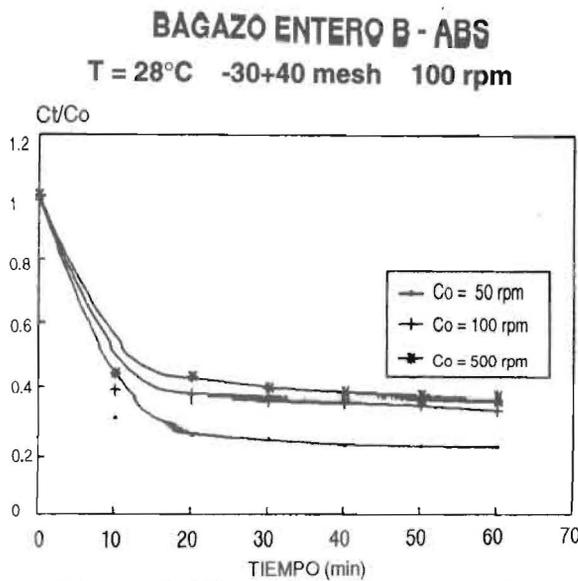


Figura 1. Efecto de la concentración.

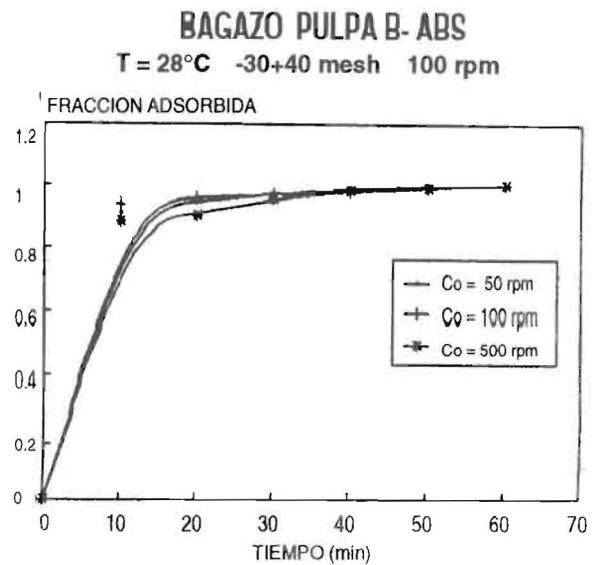


Figura 2. Efecto de la concentración.

una vez que la solución acuosa de ABS entra en contacto con las partículas de bagazo, luego se reduce bruscamente en la medida en que el gradiente de concentración de ABS disminuye. Después de los 20 minutos iniciales, la tasa de adsorción no incrementa en magnitud apreciable ya que el proceso tiende hacia las condiciones de saturación. La remoción de ABS a diferentes concentraciones de soluto (Figs. 1 y 2) tiene lugar en dos fases. La primera fase, correspondiente a la remoción inmediata de soluto, transcurre durante los primeros 10 o 12 minutos y es seguida por una posterior remoción de soluto, durante un período de tiempo mayor. Para el sistema Bagazo Entero B - ABS, se observó una tendencia similar.

Una forma efectiva de evaluar el mecanismo de adsorción para un sistema dado es mediante la expresión:

$$\Delta S = K_t \cdot t^m \quad (1)$$

donde, ΔS es el porcentaje de soluto removido, t es el tiempo de contacto, m es la pendiente de la gráfica en su forma lineal y K_t es un coeficiente constante. El valor de la pendiente, "m", de esta expresión indica el mecanismo de adsorción y el valor de K_t puede expresar el porcentaje de soluto removido por unidad de tiempo [10]. Valores de m y K_t , encontrados mediante la aplicación de una regresión lineal a los valores de $\log \Delta S$ y $\log t$ para el Bagazo Pulpa B y el Bagazo Entero

B, se presentan en las Tablas 1 y 2, respectivamente. De acuerdo con investigaciones realizadas por Weber y Morris (2), un valor de $m = 0.5$ indica que la velocidad del proceso es controlada por la difusión interna, mientras que los valores de m menores de 0.5 indican que la velocidad de adsorción es controlada tanto por la transferencia de masa externa como por la difusión interna. Los valores de m encontrados en el presente trabajo (Tablas 1 y 2) son mucho menores de 0.5 con lo que se demuestra que la velocidad de adsorción de ABS sobre bagazo es controlada tanto por la fase líquida como por la fase sólida, a las condiciones estudiadas. Por otra parte, los valores de la fracción no extraída de ABS en función del tiempo adimensional ($D \cdot t / r^2$), bajo ninguna de las condiciones estudiadas guardan la misma relación presentada por Treybal en la Figura 4.2 [11], la cual muestra la relación que debe existir entre estos parámetros en un proceso de difusión en sólido para una partícula esférica. En la Fig. 3 se muestra la relación de Treybal así como las relaciones encontradas para el Sistema Bagazo Entero B - ABS, con una $C_0 = 100$ ppm, $T = 28^\circ\text{C}$ $dp = -30+40$ mesh y agitación constante de 100 rpm, así como para el sistema Bagazo Pulpa B - ABS, a las mismas condiciones de concentración, temperatura, tamaño de partícula y agitación. Esto también contribuye a demostrar que la velocidad de adsorción de este sistema no

Tabla 1
Valores de K_t y m para el Sistema Bagazo Pulpa B-ABS

	$m \cdot 10^2$	K_t	Coef. Correl.
<u>-30+40 mesh, T = 40°C</u>			
Co = 50 ppm	3.87	60.4	0.98
Co = 100 ppm	5.86	50.1	0.96
Co = 500 ppm	14.73	34.1	0.99
<u>-30+40 mesh, Co = 500ppm</u>			
T = 28°C	8.70	44.5	0.97
T = 40°C	14.73	34.1	0.99
T = 60°C	19.24	27.7	0.95

Tabla 2
Valores de K_t y m para el Sistema Bagazo Entero B-ABS

	$m \cdot 10^2$	K_t	Coef. Correl.
<u>Co = 100 ppm, T = 28°C</u>			
-30+40 mesh	8.26	44.1	0.98
-50+60 mesh	9.42	51.0	0.97
<u>Co = 100 ppm, -50+60 mesh</u>			
T = 28°C	9.42	51.0	0.97
T = 40°C	11.70	46.7	0.98
T = 60°C	12.85	42.1	0.96

está controlada por la difusión intraparticular solamente, sino que también es controlada por la transferencia de masa de soluto desde la solución hasta la superficie de la partícula.

Los coeficientes de transferencia de masa para la fase líquida, \bar{K}_L , se determinaron, a diferentes temperaturas, para un tiempo de contacto de 8 minutos y una agitación constante y uniforme de 100 rpm, a través de la Ecuación de Transferencia:

$$-\frac{dC}{dt} = \bar{K}_L (C^* - C^*) \quad (2)$$

donde C^* es la concentración en solución para el tiempo en el cual se calcula la pendiente, (mg/l) y C^* es la concentración en equilibrio, (mg/l). La pendiente, dC/dt se determinó mediante la aplicación de un análisis numérico de Newton

Gregory Progresivo a la data de cinética. Los cálculos de las difusividades en el sólido fueron realizados a partir de la aproximación de Vermeulen (12):

$$\frac{\bar{q}_0}{q_m} = [1 - \exp(-4\pi^2 \cdot \bar{D}_f \cdot t / dp^2)]^{1/2} \quad (3)$$

donde, q_m es la capacidad máxima de saturación (mg/g), q_0 es la concentración promedio en la fase sólida a cualquier tiempo (mg/g), dp es el diámetro promedio de partícula (cm), D_f es la difusividad promedio (cm^2/s) y t es el tiempo de contacto (s).

Los coeficientes de transferencia de masa para la fase sólida se determinaron a partir de la Ecuación de Jury:

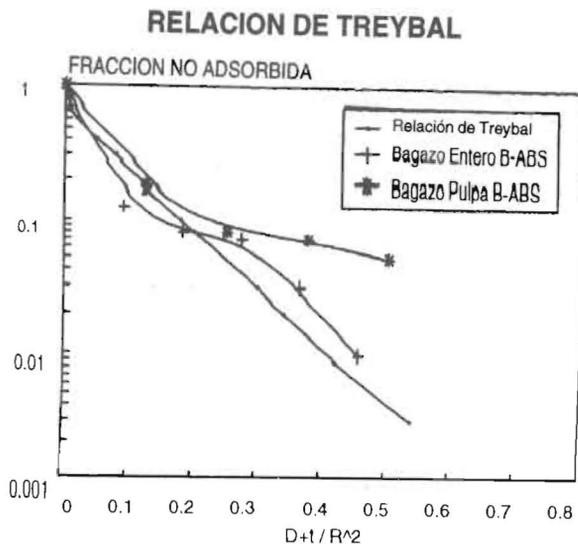


Figura 3. Difusión en el bagazo.

$$K_s = \frac{60\bar{D}_f}{dp^2} \quad (4)$$

Valores típicos de los coeficientes de transferencia de masa se muestran en las Tablas 3 y 4.

Efecto de la concentración inicial de ABS

En la Fig. 1 se muestran gráficos de C_t/C_0 contra el tiempo de contacto para las diferentes condiciones iniciales de ABS estudiadas. Se observa que, a medida que aumenta la concentración inicial, la relación C_t/C_0 es menor para un mismo tiempo de contacto. Asimismo se obtiene que, para bajas concentraciones, la tasa de adsorción inicial es mayor, indicando una reacción superficial rápida. Esto implica que la tasa de adsorción de ABS sobre el bagazo es ligeramente dependiente de la concentración.

Un análisis de la Fig. 2 muestra el mismo efecto de la concentración inicial del poluyente, para una misma temperatura y un tamaño de partícula constante. Puede observarse que para $C_0 = 50$ ppm, cerca del 95% de la capacidad de adsorción en el equilibrio es alcanzada a los 20 minutos mientras que para $C_0 = 500$ ppm, cerca del 90% de la capacidad adsorptiva final ha sido lograda en el mismo intervalo de tiempo; lo cual demuestra, nuevamente, que el tiempo para alcanzar el equilibrio es ligeramente dependiente de la concentración. De la Tabla 3 se obtiene

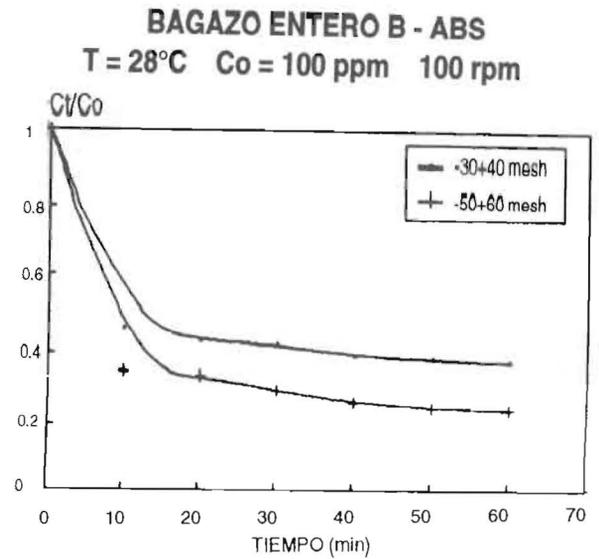


Figura 4. Efecto del tamaño de la partícula.

que los coeficientes de transferencia de masa decrecen con el incremento de la concentración inicial, para una misma temperatura, igual tiempo de contacto y tamaño de partícula constante; y esto concuerda con los resultados presentados por Corona y Pirela (3) para la remoción de ABS con carbón activado.

Efecto del tamaño de partícula

El efecto del tiempo de contacto sobre el tamaño de partícula fue estudiado para dos rangos de tamaño, -30+40 mesh y -50+60 mesh. Una gráfica de C_t/C_0 contra el tiempo de contacto para el Bagazo Entero B es presentada en la Fig. 4. La figura muestra un incremento en la velocidad de adsorción cuando el diámetro promedio de la partícula de bagazo disminuye. Esta relación se debe a que, como inicialmente el proceso es controlado por la difusión del ABS a través de la masa acuosa, la variación de la velocidad con el tiempo de contacto, en los primeros minutos, obedece al modelo de transporte de masa externa. Es decir, las partículas más pequeñas, por presentar un área superficial mayor, remueven más soluto en la fase inicial del proceso de adsorción que las partículas más grandes. Por otra parte, un análisis de los coeficientes de transferencia de masa externa (Tablas 3 y 4) muestran que un incremento en el diámetro de partícula origina una disminución de estos coeficientes, para los dos tipos de bagazo. Esto se

Tabla 3
Coeficientes de transferencia de masa para el Sistema Bagazo Pulpa B - ABS

dp = -30+40 mesh, T = 28°C, 100 rpm			
Co (ppm)	K_L (min^{-1})	D_f (cm^2/s)	K_s (s^{-1})
50	0.5946	$1.11 \cdot 10^{-7}$	$2.70 \cdot 10^{-3}$
100	0.1557	$1.03 \cdot 10^{-7}$	$2.49 \cdot 10^{-3}$
500	0.1076	$8.70 \cdot 10^{-8}$	$2.11 \cdot 10^{-3}$
Co = 100 ppm, T = 28°C, 100 rpm			
dp (mesh)			
-30+40	0.1557	$1.03 \cdot 10^{-7}$	$2.49 \cdot 10^{-3}$
-50+60	0.2093	$3.90 \cdot 10^{-8}$	$3.14 \cdot 10^{-3}$
Co = 100 ppm, dp = -30+40 mesh, 100 rpm			
Temp. (°C)			
28	0.1557	$1.03 \cdot 10^{-7}$	$2.49 \cdot 10^{-3}$
40	0.1209	$8.82 \cdot 10^{-8}$	$2.13 \cdot 10^{-3}$
60	0.0916	$6.24 \cdot 10^{-8}$	$1.51 \cdot 10^{-3}$

Tabla 4
Coeficientes de transferencia de masa para el Sistema Bagazo Entero B - ABS

Co = 100 ppm, T = 28°C, 100 rpm			
dp (mesh)	K_L (min^{-1})	D_f (cm^2/s)	K_s (s^{-1})
-30+40	0.1890	$9.43 \cdot 10^{-8}$	$2.28 \cdot 10^{-3}$
-50+60	0.4280	$2.48 \cdot 10^{-8}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$
Co = 100 ppm, dp = -30+40 mesh, 100 rpm			
Temp (°C)			
28	0.1890	$9.43 \cdot 10^{-8}$	$2.28 \cdot 10^{-3}$
40	0.1346	$8.22 \cdot 10^{-8}$	$1.99 \cdot 10^{-3}$
60	0.0747	$6.50 \cdot 10^{-8}$	$1.57 \cdot 10^{-3}$

explica a través de la relación $\bar{K}_L = k_L \cdot A$, en la cual k_L es el coeficiente de masa individual y A es el área superficial específica. Así, al incrementarse el diámetro de partícula, el área superficial específica disminuye ocasionando que los coeficientes de transferencia de masa (K_L) sean menores cuando los diámetros de partícula sean

mayores. Por otra parte, de la Tabla 2 se tiene que los valores de K_t para el Bagazo Entero B muestran una cantidad mayor de adsorbato removido en la fase inicial, $K_t = 51.0$, para un diámetro de partícula menor, -50+60 mesh, y un valor de $K_t = 44.1$, para un diámetro de -30+40 mesh, lo cual es consistente con el análisis

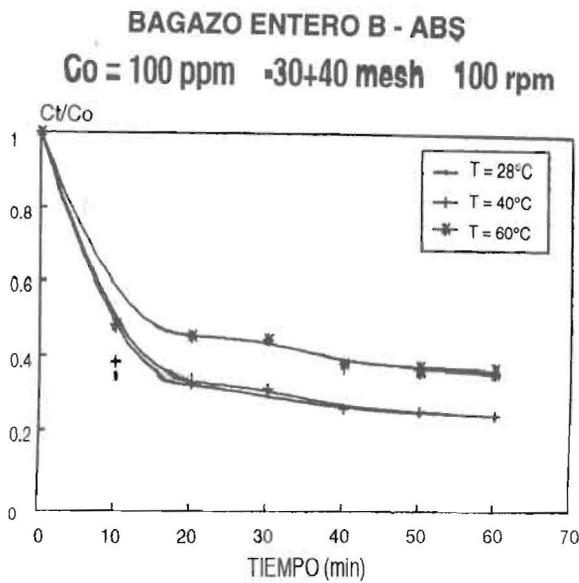


Figura 5. Efecto de la temperatura.

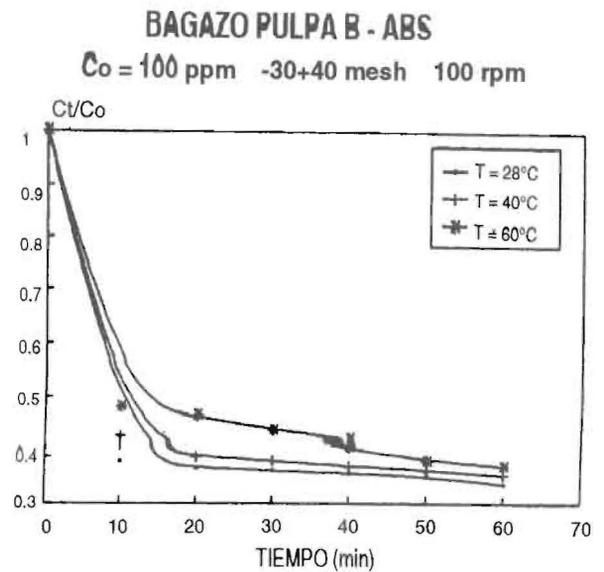


Figura 6. Efecto de la temperatura.

anterior. Un análisis del efecto del diámetro de partícula sobre el coeficiente de difusividad en sólido (Tablas 3 y 4) indica que un incremento del diámetro de partícula produce un aumento en el coeficiente de difusividad del soluto a través del bagazo para las diferentes temperaturas estudiadas. Así, a la temperatura de 28°C el coeficiente de difusividad aumenta desde $3.90 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$, a -50+60 mesh hasta $1.03 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, a -30+40 mesh, para el Bagazo Pulpa B (Tabla 3) y desde $2.48 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$, a -50+60 mesh, hasta $9.43 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$, a -30+40 mesh, a iguales condiciones de temperatura y concentración inicial, para el Bagazo Entero B (Tabla 4).

Efecto de la temperatura

El efecto de la variación de temperatura sobre la adsorción de ABS fue estudiada para un rango de temperaturas de 28 - 60°C. Una tendencia similar fue encontrada para los dos tipos de bagazo estudiados. Gráficas de C_t/C_0 contra el tiempo de contacto se muestran en las Figs. 5 y 6 para el Bagazo Entero B y el Bagazo Pulpa B, respectivamente. Se observa, en ambos casos, que la velocidad de adsorción decrece con el aumento de la temperatura. Esto es debido a que el proceso de adsorción se favorece con un descenso de temperatura pues la adsorción es exotérmica (2) y se aplica el principio de equilibrio móvil de Le Chatelier. Un fenómeno similar fue reportado por Corona y Pirela (3), para la

remoción de ABS con carbón activado. El efecto de la temperatura sobre los coeficientes de transferencia de masa (Tablas 3 y 4) muestran una tendencia similar para ambos tipos de bagazo, es decir, tanto los coeficientes de transferencia de masa externa como las difusividades disminuyen con el incremento de la temperatura y ello es consecuencia de lo anterior. Así, para el Bagazo Pulpa B (Tabla 3), el coeficiente de transferencia de masa externa disminuyó desde 0.1557 a 28°C hasta 0.0916 min^{-1} a 60°C mientras que la difusividad baja desde $1.03 \cdot 10^{-7}$ a 28°C hasta $6.24 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ a 60°C, cuando la concentración inicial es de 100 ppm y el diámetro de partícula es de -30+40 mesh. Similarmente, para el Bagazo Entero B (Tabla 4), el coeficiente de transferencia de masa externa disminuye desde 0.1890, a 28°C, hasta 0.0747 min^{-1} , a 60°C, y la difusividad decrece desde $9.43 \cdot 10^{-8}$, a 28°C, hasta $6.50 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$, a 60°C, a las mismas condiciones de concentración inicial y tamaño de partícula. Asimismo, de las Tablas 1 y 2 se destaca que los valores de K_t para un mismo tamaño de partícula y una misma concentración inicial, disminuyen desde 44.5, a 28°C, hasta 27.7, a 60°C, para el Bagazo Pulpa B (Tabla 1), y desde 51.0, a 28°C, hasta 42.1, a 60°C, para el Bagazo Entero B (Tabla 2), demostrando una menor remoción de ABS, durante la fase inicial, a medida que aumenta la temperatura, lo cual concuerda con el análisis anterior.

Conclusiones

Del análisis de la cinética de adsorción de ABS sobre bagazo se puede concluir que la velocidad de adsorción para el Sistema Bagazo - ABS es controlada tanto por la transferencia de masa externa como por la difusión de soluto a través de la partícula de bagazo, bajo las condiciones estudiadas. El tiempo necesario para alcanzar el equilibrio es ligeramente dependiente de la concentración inicial de ABS ya que, mientras menor sea esta concentración, menor será el tiempo requerido y los coeficientes de transferencia de masa decrecen con el incremento de la concentración inicial para una misma temperatura, igual tiempo de contacto y tamaño de partícula constante.

Asimismo, se observó un incremento en la tasa de adsorción cuando el diámetro promedio de la partícula de bagazo disminuía, obteniéndose valores más altos en los coeficientes de transferencia de masa externa para diámetros de partícula menores, en ambos tipos de bagazo. Con respecto al efecto de la variación de la temperatura se encontró que la velocidad de adsorción decrece con el aumento de la temperatura, para el rango de 28 - 60°C.

Nomenclatura

A: área superficial específica, m^2/g .
 C: concentración de soluto en solución de la ecuación (2), mg/l .
 Co: concentración inicial de ABS en solución, ppm.
 C*: concentración de soluto en equilibrio de la ecuación (2), mg/l .
 C^o: concentración de soluto en solución para el tiempo en el cual se calcula la pendiente de la ecuación (2), mg/l .
 Ct: concentración de ABS en solución al tiempo t, ppm.
 dp: diámetro de partícula, mesh o cm.
 \bar{K}_L : coeficiente de transferencia de masa en la fase líquida, min^{-1} .
 Ks: coeficiente de transferencia de masa en la fase sólida, s^{-1} .

K_t : constante de la ecuación (1) que indica el porcentaje de soluto removido por unidad de tiempo.

k_L : coeficiente individual de masa, $g/m^2 min$.

m: constante de la ecuación (1) que indica el mecanismo de adsorción predominante.

\bar{q}_0 : concentración promedio de soluto en la fase sólida al tiempo t, mg/g .

\bar{q}_m : capacidad máxima de saturación del sólido, mg/g .

T: temperatura, °C.

ΔS : porcentaje de soluto removido.

Referencias Bibliográficas

1. Ramalho, R. S. Introduction to Wastewater Treatment Processes. Academic Press. New York (1977).
2. Weber W. and Morris J. C. Kinetics of adsorption on carbon from solution. J. Sanit. Engng. Div. Am. Soc. Civ. Engrs 89, 31-60 (1963).
3. Corona E. y Pirela P. Cinética de remoción de detergentes con carbón activado. Trab. Esp. de Grado, Ingeniería Química, Universidad del Zulia, Maracaibo (1990).
4. McKay G., El Geundi M. and Nassar M., Equilibrium studies during the removal of dyestuffs from aqueous solutions using bagasse pith. Wat. Res., 21, 1513 (1987).
5. Alastre B., N.; Fernández, N. y García, C. Adsorción e intercambio iónico del bagazo de la caña de azúcar en el tratamiento de efluentes industriales. I. Estudios de Equilibrio. Rev. Téc. Ing., Univ. Zulia. Vol. 15, pag.1-10, 1992.
6. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Apha-Awwa-Wpcf.
7. Weber, W. Control de la calidad del agua - Procesos Físicoquímicos. Editorial Reverté S. A. (1979).
8. McKay G., El Geundi M. and Wahar A. Two resistance mass transfer model for the adsorption of dyes onto bagasse pith. Water Air and Soil Pollution, 42, 33 (1988).
9. Alastre B., Norka. Adsorción e intercambio iónico del bagazo de la caña de azúcar en

- tratamiento de desechos industriales. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental, Universidad del Zulia, Maracaibo (1991).
10. Cooney D. O., Nagere A. and Anothony L. Solvent Regeneration of activated carbon. Wat. Res. 17, 403-410 (1983).
 11. Treybal, R.. Operaciones con transferencia de masa. Editorial Hispanoamericana, S. A. Buenos Aires. Segunda Edición.
 12. Helfferich, F. Series in Advanced Chemistry ION EXCHANGE. Mc Graw-Hill. Book Company, New York, 1962.

Recibido el 14 de Julio de 1992

En forma revisada el 11 de Octubre de 1993