

Adsorción en Continuo del Colorante AB25 y el Metal Cadmio en Soluciones Binarias sobre Carbón Modificado

Continuous Adsorption of Dye AB25 and Cadmium Metal in Binary Solutions on Modified Carbon

Investigación

M.C. Ma. Teresa Gómez-García*, Dr. Rigoberto Tovar-Gómez, M.C. Ma. Teresa Hernández-Eudave, Ing. Martha Patricia Macías-Rodríguez, M.C. Edgar Azael Gutiérrez-Rodríguez, Dra. Ma. Rosario Moreno-Virgen
Tecnológico Nacional de México, Campus Aguascalientes, Departamento de Ciencias Básicas.
Av. A. López Mateos 1801 Ote. Fracc. Bona Gens, Aguascalientes, Ags., México. C.P. 20256,
Tel: +52 (449) 9105002. Correo-e mtesy_8@hotmail.com

Resumen

La variedad de contaminantes presentes en los residuos industriales representan un reto para los procesos de separación debido a que éstos comúnmente remueven uno o un grupo parecido de contaminantes. El objetivo de este trabajo es modificar un carbón activado para que tenga la capacidad de remover tanto colorante azul ácido 25 (AB25 por sus siglas en inglés), como un metal pesado (cadmio) en sistema continuo; así como observar los posibles efectos de no interacción, sinérgicos o antagónicos presentes durante el proceso de adsorción. En este estudio se observó que el colorante AB25 promueve efectos sinérgicos en la remoción de Cd^{2+} , ya que para 5 y 25 mg/L la adsorción incrementa de 1.7 a 22.8 mg/g y de 2.8 a 27.9 mg/g respectivamente cuando el AB25 se encuentra en la solución. Este efecto depende principalmente de las concentraciones de alimentación de los contaminantes. El incremento en la remoción del metal se debe a que el colorante al ser adsorbido por el carbón activado se convierte en otro sitio activo; existiendo interacciones electrostáticas entre el colorante y el cadmio.

Palabras clave: adsorción, sistema continuo, colorante AB25, metales pesados, carbón activado.

Abstract

The variety of contaminants in industrial waste represents a challenge for separation processes; because they usually remove one or a similar group of pollutants. The aim of this work is to characterize a modified activated carbon has the capability to remove both dye (AB25) and heavy metals (cadmium) in continuous systems; and observe null, synergistic or antagonistic effects. In this study it was observed that the dye AB25 promotes synergistic effects in removing cadmium, since for 5 and 25 mg/L Cd^{2+} its adsorption capacity increases from 1.7 to 22.8 and

from 2.8 to 27.9 mg/g respectively when the AB25 is present in the solution. This effect depends mainly on concentrations of contaminants in the feed. The increase in metal removal is because the dye to be adsorbed by the activated carbon becomes another active site; electrostatic interactions exist between the dye and cadmium.

Keywords: adsorption, continuous process, dye AB25, heavy metals, activated charcoal.

Introducción

En la actualidad existen distintos problemas de contaminación ambiental y, en particular, la contaminación del agua causada por colorantes y metales pesados es un tópico relevante en el contexto de la ingeniería ambiental. Sin embargo estudios sobre remoción de contaminantes en sistemas multicomponentes es un campo explorado en menor medida, esto se debe a la complejidad que puede presentar el sistema.

El objetivo de este trabajo consistió en estudiar la adsorción en sistema continuo del colorante AB25 y el Cd^{2+} en soluciones monocomponentes y binarias sobre un carbón de hulla bituminosa modificado con una solución de calcio extraído del cascarón de huevo de gallina (CHBM). Además, se analizaron los efectos de sinergia, antagonismo o no interacción presentes en soluciones binarias. También, se modelaron los resultados para obtener parámetros de diseño en sistemas continuos.

La primera parte, en el fundamento teórico, se abarcan las bases y principios de la investigación así como trabajos previos. Se hace énfasis en los trabajos donde se estudia el comportamiento en sistemas no continuos y la importancia de escalarlo al régimen continuo; este aporte permite una mejor adaptación de trabajo de laboratorio a un sistema real de remoción de contaminantes.

En materiales y métodos se describen las características de los reactivos y las concentraciones utilizadas para los estudios en continuo con CHBM, así como las condiciones de trabajo en el régimen, como es el tamaño de la columna, flujo y temperatura. Uno de los aspectos más destacables en la metodología es el planteamiento de los estudios ingresando los contaminantes en solución binaria o en monocomponente pero con carbón previamente saturado con el otro adsorbato. Dentro del apartado de resultados y discusión, se comprueba la existencia de efectos sinérgicos/antagónicos/no interacción en las soluciones binarias, así como el grado de cada uno de ellos. Además de que mejoró significativamente en sistemas binarios donde la mezcla incluye a los dos contaminantes. En la parte de conclusiones se enfatizan los efectos sinérgicos del colorante para la adsorción de cadmio y con un enfoque de reutilización, puesto que es factible la saturación del CHBM con colorante y a partir de ese proceso remover con mayor eficiencia el metal.

Fundamentos teóricos

Los colorantes son utilizados en las industrias textiles, farmacéuticas, de cosméticos, alimentos, del papel, pinturas y plásticos con el fin de obtener un producto final llamativo. Más del 15% de los colorantes usados en los procesos son desechados en los efluentes industriales provocando un grave problema de contaminación de lagos, ríos y mares [1, 2]. Los colorantes ácidos antraquinona, grupo al que pertenece el azul ácido 25 (AB25 por sus siglas en inglés) son los segundos colorantes comerciales más importantes usados en la industria textil y son considerados como contaminantes prioritarios debido a su alta toxicidad y potencial cancerígeno [3].

Por otra parte, existen otras industrias como la metal-mecánica, química, minera y automotriz que descargan metales pesados en sus aguas residuales. La contaminación por metales pesados actualmente es de gran preocupación debido al mayor conocimiento de la peligrosidad de los niveles elevados de estos tóxicos en el medio ambiente [4]. Con respecto al cadmio, es un metal importante en el contexto de control de la contaminación ambiental ya que su presencia en el agua, aun a bajas concentraciones, es dañina a la vida acuática y la salud humana. Este metal es considerado un contaminante prioritario del agua en varios países [3].

Sin embargo, el problema es más complicado porque los efluentes industriales frecuentemente contienen una gran variedad de contaminantes. En particular, algunas industrias descargan colorantes y metales pesados

dentro de sus aguas residuales y esta mezcla dificulta el tratamiento del agua ya que el color persiste aún después de los procesos de remoción convencionales y los metales pesados son no degradables [5].

Existen numerosas técnicas de tratamiento para disminuir la concentración de especies contaminantes orgánicas e inorgánicas en efluentes acuosos y con base a su naturaleza se pueden agrupar en cuatro categorías: adsorción e intercambio iónico, precipitación, métodos electroquímicos y métodos de membrana [6].

En la literatura se han propuesto varios sistemas de tratamiento para la remoción de colorantes, entre los cuales se mencionan: la coagulación para remover al colorante rojo ácido 88 [7], degradación fotocatalítica del colorante rojo directo 80 [8], membrana de filtración para tratar agua residual textil [9], descomposición microbiológica para el tratamiento de agua residual textil [6], oxidación electroquímica de los colorantes negro reactivo 5 y amarillo básico 28 [10] y adsorción de los colorantes azul ácido 80 y verde ácido 27 [11]. En el caso del colorante AB25, hay metodologías semejantes, como el uso de un bioadsorbente de cáscara de camarón [12], o carbón activado obtenido de huesos [13], también mediante membranas líquidas emulsionadas [14], procesos de adsorción/degradación fotocatalítica con hidroxipatitanano estructurada [15]. Y para la remoción de metales pesados, algunos de los métodos reportados en la literatura son: precipitación química, membrana de filtración, intercambio iónico, procesos electroquímicos, flotación, y adsorción [16, 17, 18].

Cada técnica de remoción de contaminantes tiene sus pros y contras. Por ejemplo, el mayor inconveniente con la precipitación es la producción de lodos. El intercambio iónico es considerado una mejor alternativa. Sin embargo, no es económicamente atractiva debido a sus altos costos de operación [19]. Fuera de estas técnicas, el método de adsorción es efectivo, simple y rentable, y es ampliamente adaptable. La adsorción sobre carbón activado ha probado ser uno de los métodos de tratamiento más efectivos y confiables [20].

En la literatura hay pocos reportes acerca de la adsorción simultánea de colorantes y metales pesados en solución acuosa. Por ejemplo Visa, Bogatu y Duta [5], estudiaron la adsorción simultánea de soluciones multicomponente del colorante azul de metileno y de los metales pesados cobre, cadmio y níquel empleando cenizas. Shukla y Pai [16] realizaron estudios de adsorción de cobre, níquel y zinc sobre el colorante anaranjado reactivo 13 adsorbido sobre cáscaras de maní. En ambos casos, la capacidad de adsorción de

los metales pesados incrementó cuando se encuentra presente el colorante ya sea en la solución o acumulado sobre el material adsorbente. Por su parte Kyzas, Lazaridis y Kostoglou reportaron en el estudio realizado con el colorante catiónico rojo remacil TGL en mezcla binaria con zinc utilizando succinil-quitosano injertado como adsorbente, con efecto antagónico; además se propone que en la mezcla de los dos contaminantes hay competencia por los sitios activos del adsorbente [21].

La presencia de colorantes y metales pesados en el agua, producto del proceso de transformación de industrias como la textil, papelera, pinturas y pigmentos, alimenticia, automotriz, metal mecánica y eléctrica, entre otras, dificulta el tratamiento de los efluentes debido a la presencia de múltiples especies químicas con distinta naturaleza.

Además, los efluentes industriales generalmente no mantienen concentraciones constantes a través del tiempo, afectando las interacciones que se pueden presentar en el proceso de adsorción.

Por otra parte, la gran mayoría de los efluentes generados en la industria trabajan en un régimen continuo, por lo que es relevante determinar parámetros de diseño adecuados al adsorbente empleado, los cuales se obtienen por experimentación en el mismo régimen. Por la naturaleza del proceso en continuo, presenta un mayor reto de control y conocimiento de los fenómenos de transporte que el trabajo en sistemas batch.

Debido a esto, en este trabajo se estudió la adsorción en sistema continuo del colorante AB25 y el Cd^{2+} en soluciones monocomponentes y binarias con el fin de aproximar los estudios a la realidad.

Materiales y Métodos

El estudio se dividió en dos partes principales, en la primera se estandarizaron las determinaciones analíticas o cuantificación de los contaminantes, para evaluar la capacidad del proceso de remoción. La segunda parte consiste en las pruebas en continuo para obtener las curvas de ruptura, con ello, los parámetros para el escalonamiento del proceso como información base para la aplicación de este sistema de remoción.

1. Curvas de calibración de soluciones de colorante y metal pesado.

Debido a que en este proyecto se efectuaron estudios de adsorción del AB25 y del Cd^{2+} en soluciones monocomponentes y binarias AB25- Cd^{2+} , se realizaron curvas de calibración de ambos tipos de soluciones.

Se prepararon soluciones patrón de 500 mg/L para el colorante y de 100 mg/L para el cadmio. Los reactivos empleados fueron el Azul Ácido 25 (Sigma-Aldrich) y Nitrato de Cadmio ($Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$) (J. T. Baker).

A partir de estas soluciones se realizaron diluciones de 100 y 20 mg/L para el AB25 y Cd^{2+} respectivamente. Otro proceso de dilución se efectuó para obtener 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 y 20 mg/L del colorante; y 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 y 16 mg/L de Cd^{2+} .

Para la determinación de la absorbancia y concentración del colorante AB25 se utilizó un espectrofotómetro UV-Vis HACH DR 5000 a 600nm [22]. Mientras que para el Cd^{2+} se empleó un espectrofotómetro de absorción atómica (ThermoScientific Ce 3000). El análisis estadístico para las determinaciones de las curvas de calibración se efectuó con el software Origin.

Para el caso de las mezclas binarias, las curvas de calibración se realizaron con soluciones colorante-metal a las mismas concentraciones mencionadas y se siguió el mismo procedimiento para obtener la respectiva ecuación de la recta.

2. Curvas de ruptura de soluciones monocomponente y binarias del colorante AB25 y cadmio sobre carbón modificado.

Para los estudios de remoción de contaminantes en continuo se utilizaron columnas empacadas de lecho fijo. Se utilizó una masa determinada del CHBM (3.0 g) empacada en una columna y generando un lecho de 4.5 cm de alto (L) y 1.5 cm de diámetro (D) para lograr una relación de $L/D = 3$. Para mantener constante la velocidad de flujo de la solución en la columna, se usó una bomba peristáltica ThermoScientific 72-320-083. Se acondicionó el carbón con 15 mL de agua desionizada pH 5 a una temperatura de 35°C. Después, a la columna se le comenzó a pasar la solución monocomponente o binaria a un flujo de 1 mL/min, sin recirculación, tomando muestras a la entrada y salida de la columna a determinados tiempos para posteriormente cuantificar la concentración del colorante y el metal pesado. Para mantener la temperatura constante se utilizó un termo baño Felisa FE-375.

Las soluciones que se utilizaron en los estudios en continuo fueron las siguientes: 500 mg/L de AB25, 5 y 25 mg/L de Cd^{2+} , en lo que respecta a soluciones monocomponente. Para las soluciones binarias se utilizaron las combinaciones: Cd^{2+} - AB25 a concentraciones 5-500 y 25-500 mg/L respectivamente. Además, en otros experimentos, se usó carbón saturado con Cd^{2+} para adsorber AB25 y viceversa.

Resultados y discusión

Las curvas de calibración del colorante AB25 y del Cd^{2+} en sistema monocomponente y binario permitieron determinar el intervalo de linealidad, la ecuación de la recta y el coeficiente de correlación (R^2) de cada

curva de calibración. Los valores de R^2 son mayores a 0.99, lo que indica que la ecuación de la recta se ajustó adecuadamente a los datos experimentales.

En una curva de ruptura, la capacidad de adsorción del carbón es directamente proporcional al área sobre la curva; es decir, conforme la curva de ruptura se desplaza hacia la derecha, el área sobre la curva y la capacidad de adsorción incrementan. En una solución multicomponente, la capacidad de adsorción de las especies sobre el adsorbente puede incrementar, decrecer o no cambiar.

En la literatura se reporta que pueden ocurrir tres casos en un sistema multicomponente: 1) que la adsorción de la especie i se incremente debido a la presencia de otras especies (efecto sinérgico); 2) que las otras especies no generen ningún efecto sobre la capacidad de adsorción de la especie i (efecto de no interacción); y 3) que la capacidad de adsorción de la especie i disminuya por la presencia de otras especies (efecto antagónico). Es importante mencionar que se ha reportado que existe un efecto antagónico del Cd^{2+} en el proceso de adsorción en sistema batch de sistemas binarios con otros iones de metales pesados [17]. También se sabe que en sistema batch, las capacidades de adsorción del Cd^{2+} incrementan significativamente con respecto de la concentración inicial del colorante AB25 en soluciones binarias (AB25- Cd^{2+}) y ternarias (AB25- Cd^{2+} -metal); sin embargo, la presencia de los iones de metales pesados no afecta las capacidades de adsorción del colorante AB25 en soluciones binarias[23].

En la Figura 1 se muestra la curva de ruptura del colorante AB25 en solución monocomponente y binaria con el Cd^{2+} , con una concentración de 500 mg/L para el colorante y de 5 y 25 mg/L para el Cd^{2+} . El procedimiento se efectuó hasta que la concentración de salida era mayor o igual al 95 % de la concentración de entrada. En esta Figura se observa que la presencia y la concentración del Cd^{2+} no afectan la adsorción del colorante AB25, puesto que las curvas de ruptura son similares. Es importante mencionar que además, en esta Figura se agregó la curva de ruptura de 500 mg/L de AB25 empleando el carbón previamente saturado con 5 mg/L de Cd^{2+} , y no se observa cambio significativo con respecto a las demás curvas de ruptura; lo cual confirma que entre el AB25 y el Cd^{2+} no existe interacción en el seno de la solución ni cuando el Cd^{2+} se encuentra adsorbido sobre el carbón.

En la Figura 2 se muestran las curvas de ruptura obtenidas durante el proceso de adsorción del Cd^{2+} en soluciones monocomponentes 5 y 25 mg/L de Cd^{2+} y binarias 500 mg/L de AB25 + 25 mg/L de Cd^{2+} y

500 mg/L de AB25 + 5 mg/L de Cd^{2+} . Al comparar las curvas de ruptura, es evidente que la del Cd^{2+} se desplaza en gran medida hacia la derecha con respecto a la monocomponente, es decir, existe un incremento sustancial en la adsorción del Cd^{2+} cuando el AB25 está presente en la solución, y mayormente para la solución 500 mg/L de AB25 + 5 mg/L de Cd^{2+} . Los estudios realizados en el laboratorio y que ya han sido reportados por Tovar-Gómez et al. [19-20] muestran que el AB25 favorece la adsorción de los iones de metales pesados cuando se encuentran en solución binaria colorante-metal, o ternaria colorante-metal-metal. Se menciona que este incremento en la capacidad de adsorción puede ser debido a que el AB25 es primeramente adsorbido sobre la superficie del carbón modificado generando nuevos sitios activos para los iones de metales pesados. Además de este fenómeno, puede ocurrir que desde el seno de la solución, las dos especies ya se encuentren interaccionando y ya unidas se adsorban sobre el carbón modificado. Para describir mejor el fenómeno, en este trabajo se realizaron dos curvas de ruptura: una haciendo pasar 500 mg/L de AB25 a la columna empacada con un carbón previamente saturado con 5 mg/L de Cd^{2+} ; y otra con 5 mg/L de Cd^{2+} empleando carbón previamente saturado con 500 mg/L de AB25.

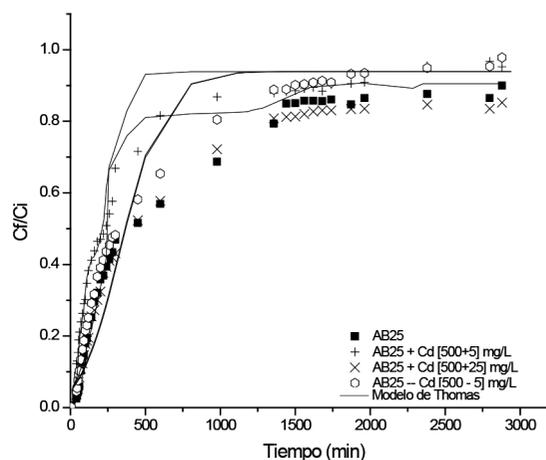


Figura 1. Curvas de ruptura del AB25 en solución monocomponente empleando carbón virgen y previamente saturado con Cd^{2+} .

En la Figura 2b se aprecia que la curva de ruptura del Cd^{2+} sobre el carbón previamente saturado con AB25 se desplaza un poco hacia la derecha de la curva de ruptura de la solución binaria AB25- Cd^{2+} , lo cual permite dilucidar que efectivamente el AB25 se adsorbe “igual” sin importar el sistema que se utilice. Sin embargo, al Cd^{2+} si le favorece la presencia del AB25 y más aún cuando ya se encuentra adsorbido. Y se confirma que el AB25 se adsorbe y genera nuevos sitios activos para la adsorción del Cd^{2+} .

Como se aprecia en la Figura 2, muestra un comportamiento constante con remoción casi total durante los primeros minutos. En estas condiciones los sitios activos del carbón se encuentran a su máxima capacidad para capturar los contaminantes, entregando un efluente con una concentración cercana a cero. En este momento, la zona de transferencia de masa (MTZ por sus siglas en inglés) se encuentra a la entrada de la columna de adsorción. Enseguida, algunas curvas comienzan a incrementar rápidamente mientras que otras lo hacen después de tiempos más largos de operación (específicamente la curva correspondiente al Cd^{2+} en presencia del colorante AB25 en solución binaria a baja concentración). Este incremento en las curvas es debido a que existe una gradual ocupación de los sitios activos del carbón. Poco a poco el carbón comienza a agotarse, la MTZ inicia su ascenso y por consecuencia se provoca un aumento en la concentración de salida, generando el punto de ruptura. La MTZ comienza a ascender en la columna, de tal manera que se incrementa la concentración de contaminantes en la solución de salida alcanzando el valor límite máximo de concentración de contaminante establecido por la norma (punto de ruptura); el tiempo en el que ocurrió el punto de rompimiento marca la terminación del ciclo de adsorción.

Después del punto de ruptura, la concentración de contaminantes a la salida incrementa a gran velocidad lo cual indica que la MTZ casi ha alcanzado la salida de la columna. El muestreo se concluyó cuando la concentración del efluente fue mayor o igual al 95 % que la de entrada, sin igualarla; esto debido a que el comportamiento de las curvas de ruptura se vuelve asintótico y se requeriría de demasiado tiempo para saturar completamente el carbón. Por lo tanto, en la columna todavía existe una zona no utilizada muy pequeña.

En la Tabla 1 se muestran los parámetros de diseño y del modelo de Thomas de las curvas de ruptura del AB25 y del Cd^{2+} en sistemas monocomponentes y binarios empleando columnas empacadas de lecho fijo. En esta Tabla se muestran los tiempos de ruptura (t_b), y de saturación (t_e), la zona de adsorción total (Δt), la zona de transferencia de masa (MTZ), el factor de retención (r_f), la constante del modelo de Thomas (KTH), la capacidad de adsorción (q_0) y el coeficiente de correlación (R^2). En general, los coeficientes de correlación de este modelo variaron entre 0.90 a 1.00, lo cual indica que el modelo de Thomas se ajusta adecuadamente a los datos experimentales de las curvas de ruptura. Como se puede observar en esta Tabla, la capacidad de adsorción del carbón en sistema en continuo para el AB25 fluctúa de 40 a 70 mg/g.

Para 5 y 25 mg/L de concentración de entrada de Cd^{2+} , su capacidad de adsorción incrementa de 1.7 a 22.8 mg/g y de 2.8 a 27.9 mg/g respectivamente cuando el AB25 se encuentra en la solución. Los tiempos de ruptura (t_b) y de saturación (t_e) de las curvas de ruptura del AB25 fluctúan de 0.42 a 0.92 h y de 46.62 a 59.37 h respectivamente; para el Cd^{2+} a 5 mg/L, incrementan de 1.00 a 152.95 h y de 96.00 a 337.00 h respectivamente; y para 25 mg/L, también aumentan de 0.02 a 28.00 h y de 65.90 a 82.14 h respectivamente, lo cual confirma que al Cd^{2+} le beneficia la presencia del AB25. Los valores reportados de MTZ para el AB25 son prácticamente iguales; mientras que para el Cd^{2+} , se reduce a la mitad cuando el AB25 está presente ya sea en la solución o en el adsorbente. Esto último indica que existe un mejor aprovechamiento del adsorbente para el Cd^{2+} en sistemas binarios debido a que existe un mejor aprovechamiento del adsorbente en sistemas binarios ya que valores bajos de MTZ son deseables para optimizar el rendimiento del proceso de adsorción.

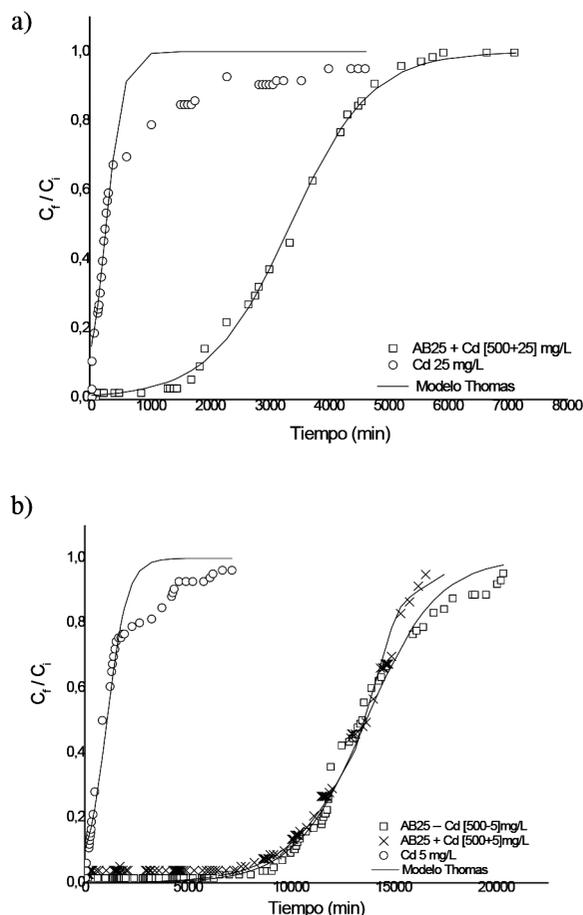


Figura 2. Curvas de ruptura del Cd^{2+} en solución: a) monocomponente y binaria; b) monocomponente empleando carbón virgen y previamente saturado con AB25 y binaria.

Solución	Adsorbato	C_0 , mg/L	Parámetros de diseño					Parámetros del Modelo de Thomas		
			t_b , h	t_e , h	Δt , h	MTZ, cm	r_f	K_{TH} , L/h mg	q_0 , mg/g	R^2
AB25	AB25	500	0.92	59.37	58.45	4.43	304.60	0.00068	66.88	0.92
AB25+ Cd^{2+}	AB25	500+5	0.42	48.00	47.58	4.46	167.67	0.00106	39.72	0.94
AB25+ Cd^{2+}	AB25	500+25	0.83	54.00	53.17	4.43	299.71	0.00067	69.71	0.90
Cd^{2+} →AB25	AB25	5→500	0.75	46.62	45.87	4.43	269.67	0.00087	53.57	0.95
Cd^{2+}	Cd^{2+}	5	1.00	96.00	95.00	4.45	581.95	0.02537	1.69	0.95
Cd^{2+}	Cd^{2+}	25	0.02	65.90	65.88	4.50	153.70	0.01679	2.76	0.90
AB25+ Cd^{2+}	Cd^{2+}	500+5	137.00	270.00	133.00	2.22	9545.26	0.00700	22.77	0.98
AB25+ Cd^{2+}	Cd^{2+}	500+25	28.00	82.14	54.14	2.97	2336.89	0.00354	27.91	1.00
AB25→ Cd^{2+}	Cd^{2+}	500→5	152.95	337.00	184.05	2.46	9410.42	0.00626	22.94	0.97

Tabla 1. Parámetros de diseño y del modelo de Thomas de las curvas de ruptura del AB25 y del Cd^{2+} en sistemas monocomponentes y binarios empleando columnas empacadas de lecho fijo.

Conclusiones

Los resultados obtenidos permitieron analizar la adsorción del colorante AB25 y el Cd^{2+} en soluciones monocomponentes y binarias sobre un carbón modificado, empleando columnas empacadas de lecho fijo. Este análisis permitió concluir que la remoción del ion metálico en las mezclas binarias metal-colorante es favorecida por la presencia del colorante AB25. Específicamente, este colorante promueve un efecto sinérgico en la remoción del Cd^{2+} y mejora significativamente las capacidades de adsorción del carbón activado empacado en las columnas de lecho fijo. La magnitud de este efecto sinérgico depende principalmente de las concentraciones de colorante y metal en la alimentación de la columna. El incremento en la adsorción del metal pesado es debido a que el colorante AB25 se adsorbe sobre el carbón modificado convirtiéndose en un sitio activo más para que se adsorban los metales pesados; es decir, existen interacciones electrostáticas entre el colorante (aniónico) y el cadmio (catiónico).

Los resultados obtenidos en este estudio también indican que el carbón activado empleado para remover el colorante AB25, en forma independiente, puede ser utilizado posteriormente en el tratamiento de fluidos que contengan exclusivamente especies metálicas. Este enfoque ofrece una alternativa para maximizar el aprovechamiento de este adsorbente y reducir costos de operación de los procesos de purificación de agua.

Referencias

- [1] G. Atun y M. Tuncay, (2009) «Adsorption equilibria between dye and surfactant in single and binary systems onto geological materials,» *Applied Clay Science*, n° 45, p. 254.
- [2] K. Badii, F. D. Ardejani, M. A. Saberi, N. Y. Limaee y S. Z. Shafaei, (2010) «Adsorption of Acid blue 25 dye on diatomite in aqueous solutions,» *Indian Journal Chemical Technology*, n° 17, pp. 7-16.
- [3] V. Hernández-Montoya y A. Bonilla-Petriciolet, (2012) Lignocellulosic Precursors used in the Synthesis of Activated Carbon - Characterization Techniques and Applications in the Wastewater Treatment, V. Hernández-Montoya y A. Bonilla-Petriciolet, Edits., InTech, p. 100.
- [4] T. K. Sen y D. Gomez, (2010) «Adsorption of zinc (Zn^{2+}) from aqueous solution on natural bentonite,» *Desalination*.
- [5] M. Visa, C. Bogatu y A. Duta, (2010) «Simultaneous adsorption of dyes and heavy metals from multicomponent solutions using fly ash,» *Applied Surface Science*, n° 256, pp. 5486-5491.
- [6] C. L. Pearce, J. R. Lloyd y J. T. Guthrie, (2003) «The removal of colour from textile wastewater using whole bacterial cells: a review,» *Dyes and Pigments*, n° 58, pp. 179-196.
- [7] M. S. Venkata, P. Sailaja, M. Srimurali y J. Karthikeyan, (1999) «Color removal of monoazo acid dye from aqueous solution by adsorption and chemical coagulation,» *Environmental Engineering Pollution*, n° 1, pp. 149-154.

- [8] N. Mahmoodi, M. Arami, N. Yousefi Limanee y N. Salman Trabizi, (2005) «Decolorization and aromatic ring degradation kinetics of direct red 80 by UV oxidation in the presence of hydrogen peroxide utilizing TiO₂ as a photocatalyst,» *Chemical Engineering Journal*, n° 112, pp. 191-196.
- [9] J. Wu, M. Eiteman y S. Law, (1998) «Evaluation of Membrane Filtration and Ozonation Processes for the Treatment of Reactive Dye Wastewater,» *Journal Environmental Engineering*, n° 124, pp. 272-277.
- [10] A. Méndez, R. Tovar, M. Davila y M. Elizalde, (2008) «Degradation of Reactive Black 5 and Basic Yellow 28 on Metallic-Polymer Composites,» *Portugaliae Electrochimica Acta*, n° 26, pp. 89-100.
- [11] M. Elizalde González y V. Hernández Montoya, (2008) «Fruit seeds as adsorbents and precursors of carbon for the removal of anthraquinone dyes,» *International Journal of Chemical Engineering*, n° 1, pp. 243-253.
- [12] M. Kousha, S. Tavakoli, E. Daneshvar, A. Vazirzadeh y A. Bhatnagar, (2015) «Central composite design optimization of Acid Blue 25 dye biosorption using shrimp shell biomass,» *Journal of Molecular Liquids*, vol. 207, pp. 266-273.
- [13] H. Reynel-Avila, D. Mendoza-Castillo y A. Bonilla-Petriciolet, (2016) «Relevance of anionic dye properties on water decolorization performance using bone char: Adsorption kinetics, isotherms and breakthrough curves,» *Journal of Molecular Liquids*, vol. 219, p. 425-434.
- [14] A. Dâas y O. Hamdaoui, (2010) «Extraction of anionic dye from aqueous solutions by emulsion liquid membrane,» *Journal of Hazardous Materials*, vol. 173, n° 1-3, p. 973-981.
- [15] S. Valizadeh, M. H. Rasoulifard y M. S. S. Dorraji, (2016) «Adsorption and photocatalytic degradation of organic dyes onto crystalline and amorphous hydroxyapatite: Optimization, kinetic and isotherm studies,» *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 33, n° 2, pp. 481-489.
- [16] S. R. Shukla y R. S. Pai, (2005) «Adsorption of Cu(II), Ni(II) and Zn(II) on dye loaded groundnut shells and sawdust,» *Sep. Purif. Technol.*, n° 43, pp. 1-8.
- [17] A. Guijarro-Aldaco, V. Hernández-Montoya, A. Bonilla-Petriciolet, M. A. Montes-Morán y D. I. Mendoza-Castillo, (2011) «Improving the Adsorption of Heavy Metals from Water Using Commercial Carbons Modified with Egg Shell Wastes,» *Ind. Eng. Chem. Res.*, n° 50, pp. 9354 - 9362.
- [18] V. Hernández-Montoya, (2007) *Preparación y caracterización de bioadsorbentes de origen frutal y su aplicación en la adsorción de colorantes*, Puebla, Puebla: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- [19] G. Ghanizadeh y G. Asgari, (2011) «Adsorption kinetics and isotherm of methylene blue and its removal from aqueous solution using bone charcoal,» *Reaction Kinetics Mechanisms and Catalysis*, n° 102, pp. 127-142.
- [20] H. Kalavathy, B. Karthik y L. R. Miranda, (2010) «Removal and recovery of Ni and Zn for aqueous solution using activated carbon from Hevea brasiliensis: Batch and column studies,» *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, n° 78, pp. 291-302.
- [21] G. Z. Kyzas, N. K. Lazaridis y M. Kostoglou, (2013) «On the simultaneous adsorption of a reactive dye and hexavalent chromium from aqueous solutions onto grafted chitosan,» *Journal of Colloid and Interface Science*, n° 407, p. 432-441.
- [22] A. G. Alshammari, (2014) «Adsorption of Acid Dyes from Wastewater on Saudi Bentonite Clay,» *Trends in Applied Sciences Research*, vol. 9, n° 10, pp. 557-573.
- [23] R. Tovar-Gómez, D. A. Rivera-Ramírez, V. Hernández-Montoya, A. Bonilla-Petriciolet, C. Durán-Valle y M. A. Montes-Morán, (2012) «Synergic adsorption in the simultaneous removal of acid blue 25 and heavy metals from water using a Ca(PO₃)₂-modified carbon,» *Journal of Hazardous Materials*, vol. 199-200, pp. 290-300.
- [24] P. Gopal, T. M. Reddy, P. Raghu, K. Reddaiah y P. V. Narayana, (2014) «The Electrochemical Redox Behaviour of Acid Blue 25 and its Quantitative Measurement at Carbon Paste Electrode: A Voltammetric Study,» *Analytical & Bioanalytical Electrochemistry*, n° 2, pp. 183-194.