

Biosorción de Cd (II) y Pb (II) en columna de lecho fijo con cáscara de cacao

L. Vera^{2*}, D. Bermejo², M.F. Uguña¹, N. García², M. Flores¹ y D. Brazales²

¹Facultad de Química Universidad de Cuenca. ²Centro de Estudios Ambientales, CEA, Universidad de Cuenca, Campus Quinta Balzay, Av. Víctor Manuel Albornoz, Cuenca Ecuador

Biosorption of Pb (II) and Cd (II) in fixed bed columns with cocoa shell

Biosorció de Cd (II) i Pb (II) en columna de llit fix amb closca de cacau

RECEIVED: 24 JANUARY 2017; REVISED: 6 JUNE 2017; ACCEPTED: 21 JULY 2017

SUMMARY

In this work the results of the biosorption of Pb (II) and Cd (II) of synthetic waters with cocoa shell in fixed bed columns are presented. The experimental data were fitted to several models describing the breakdown curve for single component and two component systems. The removal percentages of lead and cadmium in single-component systems are 91% and 90%, respectively. In bicomponent systems Pb-Cd the percentage of lead removal 88% and cadmium 90%. The Dose-Response model in two-component and single-component systems was the one that best reproduced the experimental rupture curves throughout the measured range.

Keywords: Cocoa shell; biosorption in columns; heavy metals; mathematical modeling; rupture curve.

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de la biosorción de Pb (II) y Cd (II) de aguas sintéticas con cáscara de cacao en columnas de lecho fijo. Los datos experimentales fueron ajustados a varios modelos que describen la curva de ruptura para sistemas monocomponentes y bicomponentes. Los porcentajes de remoción de plomo y cadmio en sistemas monocomponentes son 91% y 90% respectivamente. En sistemas bicomponentes Pb-Cd el porcentaje de remoción de plomo 88% y cadmio 90%. El modelo de Dosis-Respuesta en sistemas bicomponentes y monocomponentes, fue el que mejor reprodujo las curvas de ruptura experimentales en todo el rango medido.

Palabras clave: Cáscara de cacao; biosorción en columnas; metales pesados; modelación matemática; curva de ruptura.

RESUM

En aquest treball es presenten els resultats de la biosorció de Pb (II) i Cd (II) d'aigües sintètiques amb closca de cacau en columnes de llit fix. Les dades experimentals van ser ajustats a diversos models que descriuen la corba de ruptura per a sistemes monocomponents i bicomponents. Els percentatges de remoció de plom i cadmi en sistemes monocomponents són 91% i 90% respectivament. En sistemes bicomponents Pb-Cd el percentatge de remoció de plom 88% i cadmi 90%. El model de Dosi-resposta en sistemes bicomponents i monocomponents, va ser el que millor va reproduir les corbes de ruptura experimentals en tot el rang mesurat.

Paraules clau: Closca de cacau; biosorció en columnes; metalls pesants; modelat matemàtic; corba de ruptura.

*Corresponding autor: mayrav81@yahoo.es

INTRODUCCIÓN

El problema de la contaminación por metales tóxicos surge como resultado de las actividades humanas: la industria, agricultura y la eliminación de residuos mineros; estos contaminantes son descargados al medio ambiente alcanzando concentraciones por encima de los valores permisibles en las legislaciones internacionales, siendo los recursos hídricos, los de mayor riesgo por su alta velocidad de propagación; los metales pesados al estar presentes en altas concentraciones en las descargas industriales, pueden causar cambios físicos, químicos y biológicos en la composición de los cuerpos de agua, tales como: turbiedad, aumento de la demanda de oxígeno, cambios en el pH entre otros¹⁻⁶. Igualmente pueden generar la muerte de organismos superiores, además de comprometer seriamente la calidad del agua que sea requerida para el consumo humano, su efecto tóxico sobre seres vivos se da por la inhibición o bloqueo de las actividades biológicas, causando daños irreversibles²⁻⁵. Las tecnologías actuales para la eliminación de metales son extremadamente caras o complicadas, especialmente en disoluciones con menos de 100 mg. L⁻¹ de metales, además generan otros desechos tóxicos (lodos residuales) y en algunos casos es difícil alcanzar y mantener los estrictos requerimientos regulatorios¹²⁻¹³. Por lo que, urge encontrar nuevas tecnologías o materiales para la remoción de metales, donde la biosorción es observada como una nueva alternativa de remoción de metales sobre los procesos tradicionales de eliminación en aguas de desecho¹⁴⁻¹⁵.

La biosorción de metales pesados utilizando diferentes biomasa (residuos agroindustriales o restos orgánicos que se consideran material de compostaje) aún está en etapa de investigación; a pesar de que en otros estudios ha presentado ventajas en comparación con las técnicas convencionales de remoción de metales pesados, es importante determinar cuáles son las biomasa con mayor capacidad de adsorción para poder ser aplicados en un futuro a nivel industrial.

El objetivo de este estudio fue la remoción de Pb (II) y Cd (II) de aguas sintéticas en columna de lecho fijo con cáscara de cacao. Los datos experimentales fueron ajustados a varios modelos que describen la curva de ruptura para sistemas monocomponentes y bicomponentes.

Parámetros de funcionamiento de la columna Volumen del efluente

$$V_{ef} = Q * t_{total} \quad (1)$$

Donde:

Q es el caudal que circula por la columna (mL/min).
 t_{total} representa el tiempo total (min).

Capacidad máxima de la columna

El área bajo la curva de ruptura, entre los límites apropiados, representa la cantidad total de metal retenido, q_{total} , en mg, para una determinada concentración de la alimentación y puede determinarse por integración.

$$q_{total} = \frac{Q}{1000} \int_{t=0}^{t=total} C_R dt \quad (2)$$

Donde:

C_R es la concentración de metal retenido (mg/L).

Cantidad total de metal que pasa por la columna

$$m_{total} = \frac{C_o * Q * t_{total}}{1000} \quad (3)$$

Porcentaje total de metal retenido durante la operación

$$\% \text{Retenido} = \frac{q_{total}}{m_{total}} * 100 \quad (4)$$

Longitud de lecho no utilizado

El cálculo de la longitud de lecho no utilizada constituye un método para evaluar la capacidad de adsorción de biosorbentes en columnas de flujo continuo.

$$SNU = H * \left(\frac{t_s - t_b}{t_s} \right) \quad (5)$$

Donde:

H es la altura del lecho (cm)

t_s es el tiempo al que se alcanza la saturación del biosorbente

t_b es el tiempo al que se alcanza el punto de ruptura (min).

Modelado matemático del proceso de biosorción en columnas

Para calcular la capacidad de adsorción de una biomasa, es importante calcular y describir la cinética del proceso, para ello existen varios modelos matemáticos, los cuales son útiles en este aspecto, porque constituyen guías visuales para el diseño experimental y suministran las predicciones para la ejecución del proceso de biosorción en cuestión, bajo diferentes condiciones operativas.

Entre los modelos matemáticos más utilizados para describir el comportamiento dinámico de la eliminación de contaminantes en una columna de lecho fijo están los de Thomas, Yoon-Nelson y Dosis-Respuesta; estos son los modelos que se aplicarán a los datos experimentales obtenidos para biosorción de plomo y cadmio por cáscara de cacao.

Modelo de Yoon-Nelson

Yoon y Nelson este modelo asume que la velocidad con la que disminuye la probabilidad de adsorción para cada molécula de adsorbato es proporcional a la probabilidad de adsorción del adsorbato y a la probabilidad de que no se adsorba; este modelo, además de ser el menos complejo, no requiere datos relativos a las características del adsorbato, el tipo de adsorbente o las propiedades físicas del lecho y se utiliza frecuentemente para predecir el comportamiento dinámico de sistemas de composición simple o binaria. La ecuación, a continuación, describe el modelo:

$$\ln \left(\frac{C_o}{C} - 1 \right) = K_{YN} * \tau - K_{YN} * t \quad (6)$$

Donde:

C es la concentración de metal en el efluente a la salida de la columna (mg/L)

C_o es la concentración inicial del metal (mg/L)

t es el tiempo de toma de la muestra (min)

K_{YN} es la constante de proporcionalidad de Yoon-Nelson (min⁻¹) y

τ es el tiempo cuando $\frac{c}{c_o} = 0,5$ (min).

Modelo de Thomas

El modelo de Thomas es uno de los más generales y utilizados para describir el comportamiento del proceso de biosorción en columnas de lecho fijo, se utiliza para conocer la máxima capacidad de adsorción de un adsorbente y obtener el rendimiento teórico de la columna y asume que hay un flujo pistón sin dispersión axial en el lecho y que la fuerza motriz obedece a la isoterma de Langmuir. El modelo se describe mediante:

$$\frac{C}{C_o} = \frac{1}{1 + e^{\frac{K_{th}}{Q}(q_o * m_B - C_o * V_{ef})}} \quad (7)$$

Donde:

K_{th} es la constante de velocidad del modelo de Thomas (mL/min mg)

q_o es la capacidad de adsorción en el modelo de Thomas (mg/g)

m_B es la masa del biosorbente (g)

V_{ef} es el volumen del efluente (mL) y

Q es el caudal de alimentación (mL/min)

Modelo de Dosis-Respuesta

Este modelo ha sido comúnmente utilizado en la farmacología para describir diferentes tipos de procesos, actualmente está siendo empleado para describir los procesos de biosorción en columna, el cual tiene una importancia relativa ya que describe, la curva completa de ruptura con gran exactitud, además que puede minimizar los errores que resultan de usar el modelo de Thomas, especialmente a bajos o altos tiempos de remoción. La ecuación está en función tanto del volumen del efluente como del tiempo, las cuales se muestran a continuación.

En función del volumen del efluente:

$$\ln\left(\frac{C}{C_o - C}\right) = a * \ln V_{ef} - a * \ln\left(\frac{q_o * m_B}{C_o}\right) \quad (8)$$

Representando frente al volumen, se pueden obtener los valores de los parámetros del modelo, a y q_o, a partir de la pendiente y la ordenada en el origen.

En función del tiempo:

$$\ln\left(\frac{C}{C_o - C}\right) = \alpha * \ln\left(\frac{Q}{\beta}\right) + \alpha * \ln(t) \quad (9)$$

Representando $\ln\left(\frac{C}{C_o - C}\right)$ frente al tiempo, se pueden obtener los valores de los parámetros del modelo, α, β y q_o, a partir de la pendiente y la ordenada en el origen.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

La cáscara de cacao se obtuvo en Portovelo, zona costera al sur del Ecuador.

Las soluciones sintéticas se prepararon a partir de nitrato de plomo y nitrato de cadmio adquiridas como estándares certificados de 1000 ppm trazables a NIST, empleando agua destilada para las diluciones correspondientes.

Se trabaja a pH 5 que es donde se encuentran los metales en forma iónica según programa de especiación Hydra Medusa.

Los ajustes del pH se realizaron añadiendo pequeñas cantidades de soluciones 0,1 N de HCl o NaOH, según el caso.

Todos los agentes químicos usados en el presente estudio fueron grado analítico marca Merck.

Pruebas hidráulicas y selección de los parámetros de operación

Los experimentos de biosorción fueron realizados en dos columnas de vidrio, cuyas dimensiones son de 1,5 cm y 1,6 cm de diámetro interno, ambas con una altura de 50 cm. La preparación de las columnas se llevó a cabo como se describe a continuación:

En la parte inferior de las columnas se colocó gravilla con un φ de 2 mm con el objetivo de que las partículas del biosorbente no sean arrastradas en el proceso de biosorción.

Se introdujo el biosorbente en el interior de las columnas, hasta altura de lecho correspondiente a cada experimento.

La parte superior de la columna se rellenó con gravilla de un φ de 5 mm para evitar la flotación del lecho y la pérdida de material.

La operación del sistema se realizó con flujo descendente.

Los experimentos fueron ejecutados a temperatura ambiente (17° C).

Cuantificación de las muestras

Se preparan soluciones sintéticas de plomo y cadmio con una concentración $10 \frac{mg}{l}$. Una vez estudiada la biosorción de Pb (II) y Cd (II) en columna de lecho fijo, se aplicaron varios modelos a los datos experimentales de las curvas de ruptura y la determinación de los parámetros fundamentales. Las concentraciones de plomo y cadmio fueron determinadas usando la técnica de absorción atómica AANALYST 400 DE PERKIN ELMER

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estudio Hidrodinámico

Se realizó el estudio hidrodinámico de la columna para lo cual se varió la altura del lecho fijo, el diámetro de partícula y su influencia en el flujo a través de la columna. En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio para la cáscara de cacao.

Tabla 1 Resultados obtenidos del estudio hidrodinámico para la cáscara de cacao.

Cáscara de cacao				
Diámetro de la columna (cm)	h (cm)	Masa de biosorbente (gramos)		Q (mL/min)
		ϕ partícula > 1 mm	ϕ partícula > 0,594 mm	
1,5	10,5	0	5	0,34
1,5	10,5	5	0	0,72
1,5	10,5	5	0	0,72
1,6	10,5	5	0	1,25
1,6	15	7	0	2,12

El estudio hidrodinámico en columnas permitió reconocer que las mejores condiciones de operación son: diámetro de la columna 1,6 cm, tamaño de partícula >1 mm (fracción gruesa), altura del lecho de 15 cm y 7 g de biomasa para el relleno, ya que los flujos mayores que 2 mL /min proporcionan buenos resultados desde el punto de vista hidrodinámico.

Resultados a escala de laboratorio de biosorción de Pb (II) y Cd (II) en columnas de lecho fijo con cáscara de cacao

Análisis de la curva de ruptura

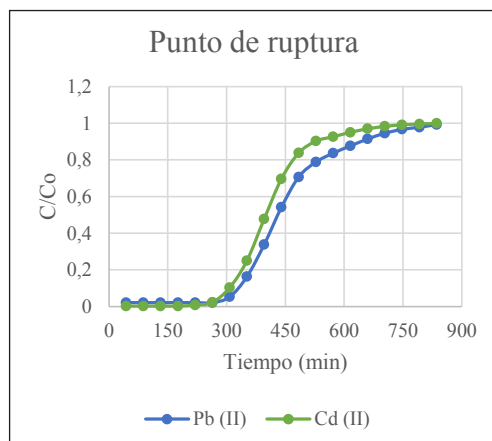
Para analizar la eliminación de Pb (II) y Cd (II) en columna de lecho fijo se elaboraron las curvas C/C_0 vs. (t) tiempo para sistemas mono-componentes y bi-componentes.

Tabla 2 Condiciones de operación para el estudio de biosorción de Pb (II) y Cd (II) con cáscara de cacao.

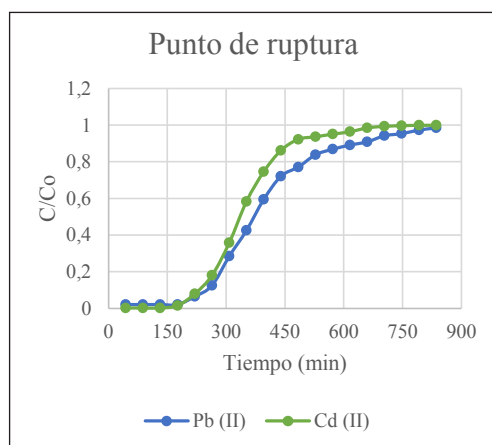
Parámetros	Sistema M-C		Sistema B-C
	Pb(II)	Cd(II)	Pb(II)-Cd(II)
h (cm)	10,5	10,5	15
Q (mL min ⁻¹)	1,9	1,9	2,4
Diámetro columna (cm)	1,6	1,6	1,6
Tamaño de partícula (mm)	> 1	> 1	> 1
Masa de cáscara de cacao (g)	5	5	7

M-C: Mono-componente
B-C: Bi-componente

Como se puede apreciar en la figura 1(a), para el sistema mono-componente, el área bajo la curva es mayor para el Cd (II) que para el Pb (II), deduciendo que la mayor adsorción correspondió al Pb (II), la cual se debe a una mayor afinidad de los sitios activos del cacao para el Pb (II). Para el sistema bi-componente (b), el área bajo la curva es mayor para el Cd (II) que para el Pb (II), con lo que podemos inferir que en la interacción de ambos metales existe una mayor afinidad por el Pb (II). Tanto en sistemas mono-componentes como bi-componentes existe mayor afinidad por el Pb (II) esto es debido a que la polarización del ión, determinan la fuerza de adsorción, la hidratación es directamente proporcional a la carga del ión e inversamente proporcional al radio iónico, siendo el radio iónico (Å) para el plomo es 1,20 y para el cadmio 0,97, lo que evidencia el mayor porcentaje de remoción para el plomo.



(a)



(b)

Figura 1 Curva de ruptura para la adsorción de Pb (II) y Cd (II) en una columna de lecho fijo relleno con cáscara de cacao en sistema mono-componente (a) y bi-componente (b).

A continuación, en la tabla 3 se muestran los parámetros obtenidos a partir del análisis de los datos experimentales presentados en las curvas de ruptura, para los sistemas mono-componentes y bi-componentes con la cáscara de cacao.

Tabla 3 Parámetros de las curvas de ruptura para la adsorción de Pb (II) y Cd (II) en columnas de lecho fijo empleando cáscara de cacao.

Parámetros Pb(II)	Sistema mono-componente		Sistema bi-componente	
	Cd(II)	Pb(II)	Cd(II)	Pb(II)
tr (min)	328	306	254	232
ts (min)	643	522	641	463
Vr (mL)	629,76	587,52	624,84	570,72
q _b (mg.g ⁻¹)	1,181	0,787	0,837	0,765
LUB (cm)	4,34	12,69	9,06	7,48
M _{total} (mg)	15,06	15,06	19,29	19,29
q _t (mg)	13,71	13,58	17,01	17,4
% adsorción	91	90	88	90

Según los datos obtenidos por las curvas de ruptura, la cantidad de metal que atravesó la columna (M_{total}) y la capacidad máxima de adsorción (q_t), se mantienen equivalentes tanto para el Pb (II) y Cd (II), para cada sistema.

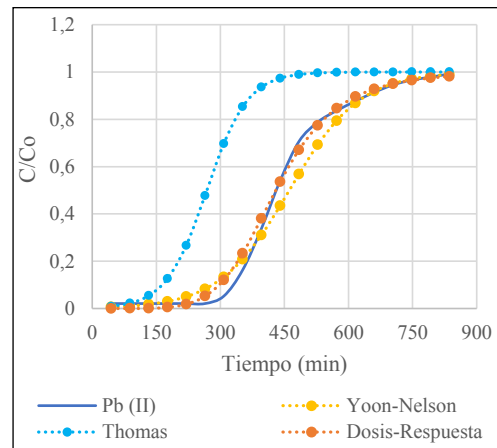
En el sistema mono-componente, los parámetros que variaron para el plomo y cadmio son los tiempos de ruptura y saturación (t_r y t_s), el volumen tratado al punto de ruptura (V_r), la capacidad de adsorción (q_b) y el lecho de longitud no utilizado (LUB), reportándose valores superiores para el Pb (II) que para el Cd (II).

Sin embargo, en el sistema bi-componente, los datos muestran que la interacción del plomo y cadmio en solución, provocaron una disminución notable de todos los valores de los parámetros variantes del sistema mono-componente, siendo el plomo el que tuvo valores superiores en comparación al cadmio, a excepción del porcentaje de adsorción, en el caso del tiempo de ruptura el plomo reportó (254 min) y fue ligeramente superior a la del cadmio (232 min), con lo que el volumen tratado para el plomo fue de (630 mL), superior a la del cadmio (463 mL), por otra parte para el tiempo de saturación, el plomo reportó (641 min), mientras que para el cadmio fue de (463 min), esto quiere decir que después de darse la ruptura, la competencia de los sitios activos por parte de los metales en cuestión, favoreció al Pb (II), siendo este último el que mayor afinidad posee ante el cadmio, esto puede explicarse ya que el radio iónico (Å) para el plomo es 1,20 mayor que para el cadmio lo que evidencia una mayor adsorción.

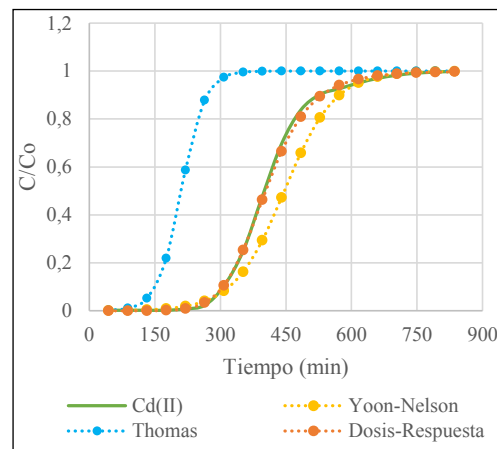
Modelos aplicados en función del tiempo sistema mono componente. Yoon-Nelson, Thomas y Dosis-Respuesta

En la figura 2 se puede apreciar que el modelo que mejor se ajusta a la curva de ruptura de Pb (II) experimental, es el de Dosis-Respuesta (R^2 de 0,96). El modelo de Yoon-Nelson se ajusta aceptablemente a los datos experimentales (R^2 de 0,96), sin embargo el valor de τ calculado (461 min) con el modelo de Yoon-Nelson es ligeramente superior al obtenido experimentalmente (430 min). El modelo de Thomas, por otra parte, es el que menos se ajusta a la curva de ruptura experimental (R^2 de 0,96).

Para el Cd (II) el modelo que mejor se ajustó a la curva de ruptura experimental fue el de Dosis-Respuesta con un R^2 de 0,99. El modelo de Yoon-Nelson por otro lado se ajusta aceptablemente a los datos experimentales con un R^2 igual a 0,97, el valor de τ calculado (446 min) es superior al valor experimental (406 min). El modelo que menos se ajustó es el de Thomas, aunque su R^2 es igual a 0,97, la curva que genera subestima a los valores experimentales. En la tabla 4, se puede apreciar los valores.[44,45].



(a)



(b)

Figura 2 Comparación de las curvas de ruptura experimental de Pb (II) (a) y Cd (II) (b) con las obtenidas por los modelos aplicados en función del tiempo en columna rellena con cáscara de cacao

Tabla 4 Parámetros obtenidos de los modelos aplicados en función del tiempo en columna rellena con cáscara de cacao para la biosorción de Pb (II) y Cd (II) (Sistema M-C)

Parámetros	Metal		
	Pb(II)	Cd(II)	
Yoon Nelson	K_{YN} (min^{-1})	0,0122	0,0174
	τ exp (min)	430	406
	τ calc (min)	461,46	446
	R^2	0,96	0,97
Thomas	K_{th} ($\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	2,1996	4,0009
	q_0 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	0,88	0,588
	R^2	0,96	0,97
Dosis Respuesta	A	5,9665	7,9198
	B	739,033	855,507
	q_0 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	1,41	1,127
	R^2	0,96	0,99

Las capacidades de adsorción obtenidos experimentalmente para el plomo y el cadmio con cáscara de cacao son 1,18 y 0,79 mg g⁻¹ respectivamente, en comparación con los valores obtenidos en los modelos, el de Dosis-respuesta es el más aproximado al valor del plomo, mientras que el modelo de Thomas da valores más aproximados para el cadmio.

Modelos aplicados en función del tiempo sistemas bicomponentes. Yoon-Nelson, Thomas y Dosis-Respuesta

Para el sistema Bi-componente los modelos de Yoon-Nelson, Thomas y Dosis-Respuesta fueron aplicados por separado, para apreciar mejor los ajustes de las curvas de ruptura modeladas con las experimentales.

A continuación, en la figuras 3-5 se hace una comparación de las curvas de ruptura experimentales del plomo y cadmio con las respectivas curvas de ajustes.

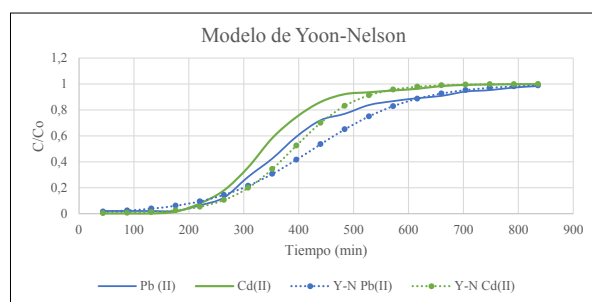


Figura 3 Comparación de las curvas de ruptura experimentales de Pb (II) y Cd (II) con las obtenidas con los modelos de Yoon-Nelson con cáscara de cacao en sistema B-C.

Como se aprecia en la figura anterior, el modelo de Yoon-Nelson se ajusta adecuadamente a las curvas de ruptura experimentales de plomo y cadmio en el sistema bi-componente, las curvas modeladas con Yoon-Nelson reportaron un R² de 0,96 para el plomo y 0,97 para el cadmio (tabla 5). En lo que respecta a los valores de τ , para el plomo el valor experimental (368 min) es inferior al valor calculado por el modelo (427 min), mientras que para el cadmio el valor experimental (332 min) es inferior al valor calculado por el modelo (390 min).

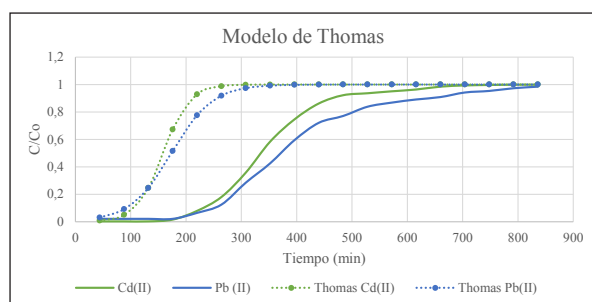


Figura 4 Comparación de las curvas de ruptura experimentales de Pb (II) y Cd (II) con las obtenidas con los modelos de Thomas con cáscara de cacao en sistema B-C.

Las curvas obtenidas por el modelo de Thomas no se ajustan a ninguno de los dos metales estudiados, pese a que los valores de R² del modelo para el plomo corresponden a 0,96 mientras que para el cadmio el valor es de 0,97.

A continuación, en la figura 5 se hace una comparación de las curvas de ruptura experimentales del plomo y cadmio con las respectivas curvas de ajustes obtenidas del modelo de Dosis-Respuesta (en función del tiempo), en la tabla 5 se encuentran los valores de los parámetros encontrados del modelo.

De todos los modelos en función del tiempo, el de Dosis-respuesta es el que mejor se adapta a los datos experimentales tanto del plomo como del cadmio. Con valores de R² igual a 0,95 para el plomo y 0,97 para el cadmio.

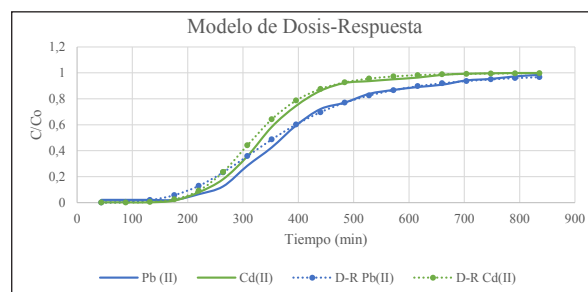


Figura 5 Comparación de las curvas de ruptura experimentales de Pb (II) y Cd (II) con las obtenidas por el modelo de Dosis-Respuesta (en función del tiempo) en columna rellena con cáscara de cacao en sistema B-C

Tabla 5 Parámetros obtenidos de los modelos aplicados en función del tiempo en columna rellena con cáscara de cacao para la biosorción de Pb (II) y Cd (II) (Sistema B-C).

	Parámetros <i>Pb(II)</i>	Metal	
		<i>Cd(II)</i>	
Yoon Nelson	K_{YN} (min ⁻¹)	0,0109	0,017
	τ exp (min)	368	332
	τ calc (min)	427	390
	R ²	0,96	0,97
Thomas	K_{th} (L.mg ⁻¹ .min ⁻¹)	2,7815	4,5855
	q ₀ (mg.g ⁻¹)	0,588	0,509
	R ²	0,96	0,97
Dosis Respuesta	A	3,964	6,1284
	B	877,922	787,254
	q ₀ (mg.g ⁻¹)	1,21	1,03
	R ²	0,95	0,97

CONCLUSIONES

En el estudio de los sistemas mono-componentes para plomo y cadmio existe un porcentaje de remoción con valores superiores al 90%, siendo mayores para el plomo, ya que el radio hidratado, o bien la polarización del ión, determinan la fuerza de adsorción, la hidratación es directamente proporcional a la carga del ión e inversamente proporcional al radio iónico, siendo el radio iónico (Å) para el plomo es 1,20 y para el cadmio 0,97, lo que evidencia el mayor porcentaje de remoción para el plomo. Para sistema bi-componente (Pb (II)-Cd (II)) la remoción fue más efectiva para el cadmio con valores de 90% e inferiores al 90% para el plomo. Las capacidades de adsorción determinados para cada metal en los sistemas mono-componentes se modificaron en presencia de otro metal competidor en los sistemas bi-componentes, lo que sugiere que no se puede deducir el comportamiento de un biosorbente solamente considerando los resultados en sistemas mono-componentes.

El modelo de Dosis-Respuesta en sistemas bicomponentes y monocomponentes, fue el que mejor reprodujo las curvas de ruptura experimentales en todo el rango medido (valores de $R^2 > 95$). A través de los parámetros encontrados con este modelo es posible obtener una expresión que reproduzca el comportamiento de las columnas en otras condiciones experimentales, sin necesidad de realizar otros experimentos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al proyecto PROMETEO, al SENES-CYT y al Centro de Estudios ambientales de la Universidad de Cuenca por la oportunidad de realizar este trabajo que traerá resultados novedosos al aplicarlo a la industria minera.

REFERENCES

1. Bhatnagar, A.; Minocha, A.K.; Sillanpää, M. Adsorptive removal of cobalt from aqueous solution by utilizing lemon peel as biosorbent. *Biochem. Eng. J.* **2010**, *48*, 181–186.
2. Ali, I. The quest for active carbon adsorbent substitutes: Inexpensive adsorbents for toxic metal ions removal from wastewater. *Sep. Purif. Rev.* **2010**, *39*, 95–171.
3. Ali, I. New generation adsorbents for water treatment. *Chem. Rev.* **2012**, *112*, 5073–5091.
4. Ali, I.; Asim, M.; Khan, T.A. Low cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater. *J. Environ. Manage.* **2012**, *113*, 170–183.
5. Khoramzadeh, E.; Nasernejad, B.; Halladj, R. Mercury biosorption from aqueous solutions by sugarcane bagasse. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* **2013**, *44*, 266–269.
6. Aloma, I.; Martín-Lara, M.A.; Rodríguez, I.L.; Blázquez, G.; Calero, C. Removal of nickel(II) ions from aqueous solutions by biosorption of sugarcane bagasse, J. Taiwan *Inst. Chem. Eng.* **2013**, *43*, 275–281.
7. Liu, C.; Ngo, H.H.; Guo, W.; Tung, K.-L. Optimal conditions for preparation of banana peels, sugarcane bagasse and watermelon rind in removing copper from water. *Bioresour. Technol.* **2012**, *119*, 349–354.
8. Martín-Lara, M.A.; Blázquez, G.; Ronda, A.; Rodríguez, I.L.; Calero, M. Multiple biosorption-desorption cycles in a fixed-bed column for Pb(II) removal by acid-treated olive stone. *J. Ind. Eng. Chem.* **2012**, *18*, 1006–1012.
9. Ali, I. Water treatment by adsorption columns: Evaluation at ground level. *Sep. Purif. Rev.* **2014**, *43*, 175–205.
10. Saha, B.; Orvig, C. Biosorbents for hexavalent chromium elimination from industrial and municipal effluents. *Coord. Chem. Rev.* **2010**, *254*, 2959–2972.
11. Calero de Hoces, M.; Blázquez García, G.; Gálvez, A.; Martín-Lara, M.A. Effect of the acid treatment of olive stone on the biosorption of lead in a packed-bed column. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2010**, *49*, 12587–12595.
12. Singh, A.; Kumar, D.; Gaur, J.P. Continuous metal removal from solution and industrial effluents using *Spirogyra* biomass-packed column reactor. *Water Res.* **2012**, *46*, 779–788.
13. Senthil Kumar, P.; Ramalingam, S.; Sathyaselvabala, V.; Kirupha, S.D.; Sivanesan, S. Removal of copper (II) ions from aqueous solution by adsorption using cashew nut shell. *Desalination*. **2011**, *266*, 63–71.
14. Valderrama, C.; Arevalo, J.; Casas, I.; Martínez, M.; Miralles, N.; Florido, A. Modelling of the Ni (II) removal from aqueous solutions onto grape stalk wastes in fixed-bed column, *J. Hazard. Mater.* **2010**, *174*, 144–150.
15. Blázquez, G.; Calero, M.; Hernáinz, F.; Tenorio, G.; Martín-Lara, M.A. Batch and continuous packed column studies of chromium (III) biosorption by olive stone, *Environ. Prog. Sust. Energy.* **2011**, *30*, 576–585.
16. Vera, L.; Uguña, F.; García, N.; Marittza, F. Eliminación de los metales pesados de las aguas residuales mineras utilizando el bagazo de caña como biosorbente. *Afinidad.* **2016**, *573*, 43–49.
17. Rodríguez I.; Kumar, N.; Vicente, A. Modeling of two up-flow fixed-bed columns in series for the biosorption of Cr^{6+} and Ni^{2+} by sugarcane bagasse. *Desalination and Water Treatment.* **2015**, *56*, Issue 3