

Remoción de Cu(II) y Ni(II) en medio acuoso empleando zeolita cubana natural

Removal of Cu(II) and Ni(II) in aqueous medium using natural Cuban zeolite

Miguel Garrido-Rodríguez¹, Mercedes Eulalia Sosa-Martínez^{2*}, Armín Mariño-Pérez¹

¹Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba.

²Universidad de Moa, Cuba.

*Autor para la correspondencia: sosamartinez2010@gmail.com

Resumen

La adsorción es uno de los métodos utilizados para eliminar la contaminación en residuales líquidos. Esta investigación tuvo el propósito de caracterizar la remoción de iones Cu(II) y Ni(II) al emplear zeolita en estado natural de la zona central de Cuba y aplicando el método de adsorción con soluciones modeladas, en un rango de pH entre 4 y 6 unidades. Se evaluaron las propiedades adsorptivas del mineral y se determinaron los parámetros de adsorción de los iones Cu(II) y Ni(II). El estudio cinético demostró que el modelo de pseudosegundo orden describe la velocidad de adsorción de ambos contaminantes y que la ecuación isoterma de adsorción de Freundlich es la de mejor ajuste para ambos iones. La capacidad máxima de adsorción de la zeolita natural es de 22,148 mg/g y 90,09 mg/g para los iones Cu(II) y Ni(II), respectivamente.

Palabras clave: adsorción; modelo cinético; isoterma de adsorción; capacidad de adsorción; cobre; níquel; contaminantes; residual líquido.

Abstract

Adsorption is one of the methods used to remove contamination in liquid waste. The purpose of this research is characterizing the removal of Cu (II) and Ni (II) ions using zeolite in its natural state from the central zone of Cuba and applying the adsorption method with modeled solutions, in a pH range between four and six units. The adsorption properties of the mineral were evaluated and the adsorption parameters of Cu (II) and Ni (II) ions were determined. The kinetic study showed that the pseudo-second -order kinetic mode describes the rate of adsorption of both contaminants and the Freundlich adsorption isothermal equation is the best fit for both ions. The

maximum adsorption capacity of the natural zeolite was 22.148 mg/g and 90.09 mg/g for Cu (II) and Ni (II) ions, respectively.

Keywords: adsorption; kinetic mode; adsorption isotherm; adsorption capacity; copper; nickel; contaminants; residual liquid.

1. INTRODUCCIÓN

El agua residual de los procesos industriales constituye una de las principales vías de contaminación ambiental; por ello, los métodos de tratamiento de residuales líquidos cobran gran importancia (Basso y Cukierman 2001; Ahmet *et al.* 2007; Ghassabzadeh *et al.* 2010; Tapia *et al.* 2017, 2018; Carbonel 2018; Pabón *et al.* 2020). Entre los métodos con esta finalidad, la adsorción usando materiales naturales como adsorbente (Alkan 2001; Ahmet *et al.* 2007; Blanchard, Maunaye y Carbonel 2018) se aplica en las investigaciones científicas para la recuperación de metales pesados tales como cadmio, cobre, mercurio, níquel, hierro, plomo y zinc (Cabrera, Gabaldon y Marzal 2005; Blanchard, Maunaye y Carbonel 2018; Carbonel 2018; Garrido *et al.* 2019; Pabón *et al.* 2020; Mishell, Johama y Ramirez 2022).

Diversas tecnologías y métodos de análisis se emplean para eliminar la contaminación del agua por metales pesados (Basso y Cukierman 2001; Caviedes, Delgado y Olaya 2016; Coz 2022; Ghassabzadeh *et al.* 2010; Góngora y Sosa 2022; Leyva *et al.* 2001; Tejeda y Herrera 2014; Zamzov *et al.* 1990). Uno de los más usados en la actualidad en el tratamiento de residuales con iones metálicos en soluciones es el método de absorción (Alkan 2001; Córdova 2015; Rodríguez 2016).

Con base en sus propiedades adsorbentes la zeolita, natural o modificada, constituye uno de los adsorbentes investigados en el tratamiento de residuales industriales (Estupiñán y otros 1998; Leyva *et al.* 2001; Rodríguez *et al.* 2006; Tapia *et al.* 2011; Malamis y Katsou 2013; Ismadji, Soetaredjo y Ayucitra 2015; Rodríguez 2016; Armas y Calapaqui 2022). Algunos autores (Estupiñán, Sarmiento y de Galvis 1998; Cabrera, Gabaldon y Marzal 2005; Rodríguez *et al.* 2006) investigan el intercambio catiónico empleando una zeolita natural (clinoptilolita) con relación Si/Al igual a 5, inicialmente con soluciones patrón de Cu(II) y Ni(II) y posteriormente con los enjuagues de los baños de recubrimientos metálicos, en el tratamiento de residuales de recubrimientos electrolíticos mediante adsorción para disminuir la contaminación por iones Cu(II) y Ni(II).

La industria cubana del níquel aplica tratamiento a sus residuales líquidos para minimizar su impacto ambiental y recuperar iones metálicos disueltos. A este fin se han utilizado zeolitas naturales en la recuperación de Ni(II),

Co(II) y amonio de las soluciones carbonato amoniacaes residuales del proceso de lixiviación Carón de minerales lateríticos. En una investigación Rodríguez, Rodríguez y Basa (1997) demuestran la selectividad por el amonio en una primera etapa, que luego favorece la adsorción mediante el intercambio de iones Ni(II) y Co(II) en la segunda etapa. Comprueban la diferencia en las velocidades de adsorción, lo que podría ser una vía para la separación selectiva de los iones metálicos. Posteriormente al usar mezclas de soluciones residuales de los procesos de lixiviación carbonato amoniacaal, con pH igual a 9, y de la lixiviación ácida a presión, con pH igual a 3, comprueban la recuperación de Ni(II), Co(II) y la neutralización del residual a pH igual a 7.

Resultados de pruebas de adsorción (Tapia *et al.* 2011) demuestran que la zeolita natural adsorbe los iones Cu(II) con una eficiencia de remoción cercana al 99 % durante los primeros 60 minutos. Los tiempos de ruptura y saturación se alcanzan a las 4,2 h y 34,6 h, respectivamente. En cuanto a la reutilización de la zeolita, se determina que su capacidad de captación de iones Cu(II) es completamente regenerada mediante la aplicación de una solución de NaCl (100 g/L).

Cabrera, Gabaldon y Marzal (2005) analizaron el uso del material zeolítico natural de Cuba para la remoción de varios iones metálicos, tales como Cu(II), Zn(II) y Ni(II), con el propósito de evaluar su uso potencial como un adsorbente de bajo costo. Ellos demuestran que la selectividad de estos iones metálicos sigue el orden siguiente: Cu(II) > Zn(II) > Ni(II).

Rodríguez (2016) evalúa la capacidad de adsorción de zeolitas naturales: clinoptilolita y heulandita, para los cationes metálicos de plomo(II), Cu(II), cinc(II), manganeso(II), Ni(II) y amonio. Las pruebas realizadas con clinoptilolita evidenciaron grados de remoción con el orden siguiente: Pb(II) > Cu(II) > Cd(II) > Zn(II) > Mn(II) > Ni(II) y el proceso cumple la ecuación isoterma de adsorción de Freundlich; mientras que en los ensayos con heulandita, la selectividad de remoción siguió el orden: Pb(II) > Cd(II) > Cu(II) > Zn(II) > Mn(II) > NH₄⁺. Los resultados con zeolita heulandita tratada con una solución de cloruro de sodio demostró que la capacidad de adsorción de Cu(II) es superior al de Zn(II) y Mg(II).

Esta investigación tuvo el propósito de caracterizar la remoción de iones Cu(II) y Ni(II) empleando como material adsorbente zeolita en estado natural de la zona central de Cuba y aplicando el método de adsorción con soluciones acuosas modeladas, en un rango de pH entre 4 y 6 unidades.

2. MATERIAL Y MÉTODO

Se utilizó zeolita natural cubana con tamaño de partícula de 0,47 mm, área específica de 38,5 m²/g cuya composición química refleja contenidos de

sílice y aluminio superiores al 65 % y 11 %, respectivamente; calcio inferior al 3,5 % y el resto de los componentes inferiores al 2 % (Tabla 1).

Tabla 1. Composición química de la zeolita natural empleada

Fases	%	Fases	%
SiO ₂	66 - 68,6	CaO	2,78 - 3,19
Al ₂ O ₃	11,8 - 12,7	MgO	0,95 - 0,77
Fe ₂ O ₃	1,07 - 2,08	TiO ₂	0,10 - 0,25
Na ₂ O	1,34 - 1,57	PPI	10,80 - 11,02
K ₂ O	1,09 - 1,20	---	---

La composición mineralógica, determinada por difracción de rayos X muestra que entre el 70 % y el 85 % de la zeolita es clinoptilolita-mordenita, con cantidades minoritarias de cuarzo y óxidos e hidróxidos de hierro.

Para analizar el proceso de adsorción se prepararon soluciones acuosas modeladas, usando reactivos puros con concentraciones en un intervalo de 300 mg/L -1500 mg/L para el Cu(II) y 100 mg/L -1500 mg/L para el Ni(II), las cuales fueron almacenadas en condiciones ambientales. Los experimentos se realizaron en *batch*, con dosis de zeolita de 10 g a 15 g. Se empleó el método espectrofotométrico en la determinación de las concentraciones de Cu(II) y Ni(II) en las soluciones modeladas.

2.1. Métodos de estudio cinético

Varios modelos matemáticos empíricos permiten obtener los parámetros cinéticos de adsorción con los cuales es posible describir el fenómeno físico o químico que tiene lugar. Entre estos se encuentran los modelos de pseudo-primer orden, pseudo-segundo orden, segundo orden y difusión intraparticular (Azizian 2004; Kennedy y Murthy 2010). La adsorción en la interface sólido-líquido en un sistema perfectamente mezclado es descrita generalmente por las etapas siguientes:

Etapa 1: Difusión del soluto desde el seno de la fase líquida hacia la película líquida que rodea el adsorbente.

Etapa 2: Difusión a través de la película líquida que rodea las partículas del adsorbente.

Etapa 3: Difusión en los poros del adsorbente o difusión intraparticular.

Etapa 4: Adsorción en los sitios activos del material.

Se considera que la velocidad del proceso está controlada por las etapas 2 y 3, difusión externa y la difusión intraparticular, respectivamente. En el

estudio cinético se analizaron los modelos siguientes que describen la velocidad del proceso (Tabla 2):

- Modelo de pseudo-primer orden propuesto por Lagergren (Ghassabzadeh 2010), comúnmente usado en el caso de la adsorción física, siendo la velocidad de adsorción proporcional a la concentración de soluto.
- Modelo de pseudo-segundo orden. En este modelo la etapa limitante de la velocidad está dada por la quimisorción.
- Modelo de segundo orden. Característico en la adsorción química sobre materiales altamente heterogéneos. Considera que la adsorción tiene lugar en sitios energéticamente diferentes sobre la superficie del sólido.
- Modelo de la difusión intraparticular. Este describe que el transporte del adsorbato desde el seno de la solución hacia la fase sólida; está dado por el proceso de transporte/difusión intraparticular, siendo el paso limitante en muchos procesos de adsorción.

Tabla 2. Modelos cinéticos analizados en la investigación

Modelo cinético	Ecuación	Variables
Pseudo-primer orden	$q = q_e * (1 - e^{-k_1*t})$	q: masa del ion adsorbido en un tiempo t (mg/g) qequil: masa del ion adsorbido en el equilibrio (mg/g) k1: constante de adsorción de Lagergren (min-1)
Pseudo-segundo orden	$\frac{t}{q} = \frac{1}{k_2 * q_e^2} + \frac{t}{q_e}$	q: cantidad del ion adsorbido en un tiempo t (mg/g) qequil: cantidad del ion adsorbido en el equilibrio (mg/g) k2: constante de velocidad de pseudo-segundo orden para el proceso de adsorción (g/mol*min)
Modelo de segundo orden	$q = \frac{1}{b} * (1 - a * b * t)$	q: cantidad del ion adsorbido en el tiempo (mg/g) a: constante de adsorción del ion (mol/g) b: constante de desorción (mol/g)
Modelo de difusión intraparticular	$q = k_i * t^{0,5} + c$	q: cantidad de la molécula adsorbida en el tiempo (mg/g) ki: constante de velocidad intraparticular (mg/g·min 0,5). C: intercepto de la línea recta la cual es proporcional al grosor de la capa límite (mg/g).

2.2. Isotermas de adsorción

El estudio de adsorción puede realizarse mediante la identificación de la forma y la curvatura de las isotermas de adsorción y mediante su modelo matemático (Azizian 2004; Garrido *et al.* 2019). La forma de las isotermas depende en gran medida del tipo de adsorbente y el adsorbato, por tanto, las mismas serán diferentes como se indica en la Figura 1, según la clasificación de la IUPAC.

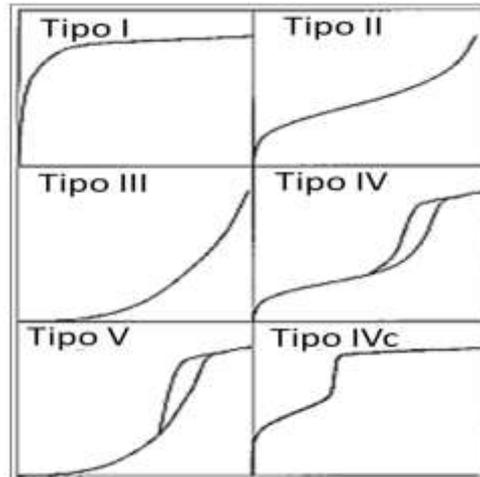


Figura 1. Clasificación de las isotermas experimentales de adsorción.

Para el análisis de los datos experimentales se han desarrollado diversos modelos matemáticos, siendo los más utilizados: Langmuir, Freundlich y Langmuir-Freundlich. Aunque existen otros modelos como el de Redlich-Peterson, Toth, Tempkin, entre otros.

2.2.1. Isotherma de Langmuir

Este modelo considera que la superficie está idealmente limpia y homogénea. La adsorción ocurre en sitios específicos del adsorbente y todos son idénticos. Solo un adsorbato ocupa cada sitio, y una vez formada la monocapa cesa la adsorción. Puede ser descrito por la ecuación 1.

$$Q_{ads} = \frac{K_L \cdot (N_m \cdot C_{eq})}{1 + K_L \cdot C_{eq}} \quad (1)$$

Donde:

Q_{ads} : cantidad de soluto adsorbido por peso unitario de adsorbente (mol/g).

N_m : capacidad máxima de adsorción (mol/g).

K_L : constante de saturación (mol/L).

C_{eq} : concentración del adsorbato en la disolución en el equilibrio (mol/L).

Las características esenciales del modelo de Langmuir pueden ser expresadas en términos del factor de separación (R_L), el cual está definido por la ecuación 2.

$$R_L = \frac{1}{1+K_L * C_{eq}} \quad (2)$$

De acuerdo al valor de R_L la forma de la isoterma puede ser interpretada de la siguiente forma:

$R_L > 1$, adsorción no favorable

$R_L = 1$, adsorción lineal

$0 < R_L < 1$, adsorción favorable

$R_L = 0$, adsorción irreversible

2.2.2. Isotherma de Freundlich

Este modelo fue establecido empíricamente y se basa en que la adsorción es de naturaleza física, no hay asociación de las moléculas adsorbidas y la superficie del adsorbente es heterogénea.

El modelo clásico de Freundlich está descrito por la ecuación 3.

$$Q_{ads} = k_F * C_{eq}^{1/n} \quad (3)$$

Donde:

Q_{ads} : cantidad de soluto adsorbido por peso unitario de adsorbente (mol/g).

$1/n$: coeficiente de Freundlich ($1 < n < 10$).

k_F : constante de Freundlich (mol/g).

C_{eq} : concentración del adsorbato en la disolución en el equilibrio (mol/L).

Es un modelo útil para determinar la adsorción en soluciones líquidas y es riguroso para los casos que ocurren en superficies heterogéneas.

2.2.3. Isotherma de Langmuir-Freundlich

El modelo de Langmuir-Freundlich es una combinación de ambos, por lo que representa una adsorción mediante una combinación de mecanismos sobre materiales heterogéneos. La ecuación 4 describe este modelo.

$$Q_{ads} = \frac{K * C_{eq}^{1/n}}{1 + b * C_{eq}^{1/n}} \quad (4)$$

Donde:

Qads: cantidad de soluto adsorbido por peso unitario de adsorbente (mol/g)

1/n: coeficiente de Freundlich ($1 < n < 10$)

K, b: constantes empíricas del modelo de Langmuir

Ceq: concentración del adsorbato en la disolución en el equilibrio (mol/L)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Utilizando zeolita como material adsorbente para la remoción de iones Cu(II) y Ni(II) de soluciones acuosas modeladas (Martin 1984; Zamzow 1990; Rodríguez, Rodríguez y Basa 1997; Leyva 2001; Rodríguez *et al.* 2006; Kennedy y Murthy 2010; Tapia *et al.* 2011; Malamis y Katsou 2013; Rodríguez 2016) se obtuvieron los modelos cinéticos y las ecuaciones isoterma de adsorción que describen el proceso de recuperación de los iones Cu(II) y Ni(II).

El estudio cinético permitió comprobar que la remoción del Cu(II) y Ni(II), muestra inicialmente un incremento paulatino de la masa de iones metálicos adsorbidos, hasta alcanzar valores constantes que representan el estado de equilibrio o de saturación de la superficie del material adsorbente. En las Figuras 2 y 3 se comprueba que para el Cu(II) el equilibrio se establece a los 80 min, mientras que para el Ni(II) es a partir de 60 min; en ambos casos el tiempo óptimo, según las condiciones experimentales, para lograr la máxima remoción de Cu(II) y Ni(II).

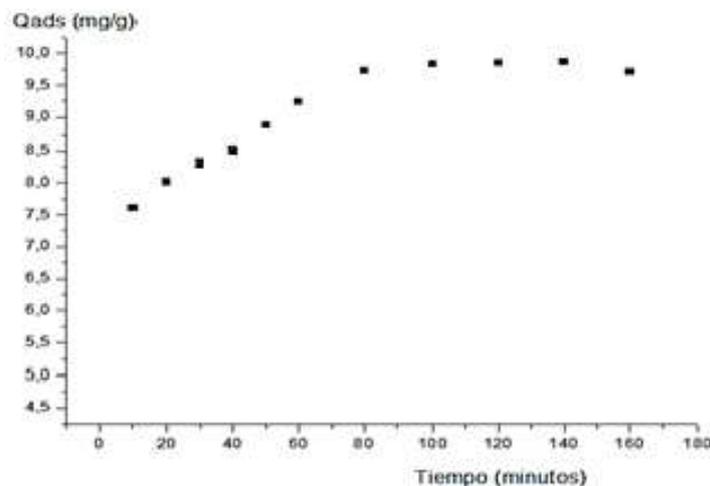


Figura 2. Cinética de adsorción de iones Cu(II) por la zeolita natural.

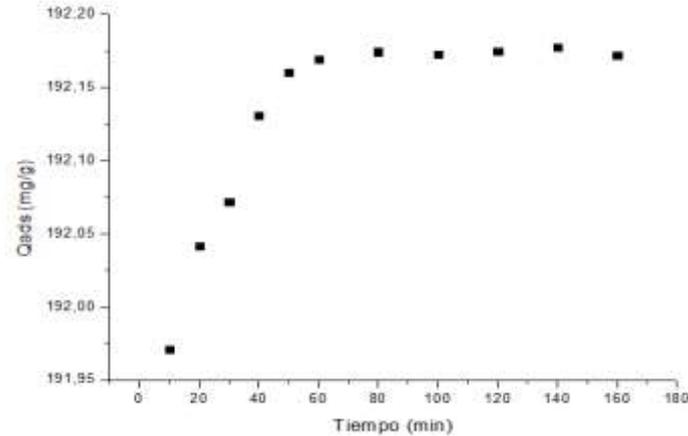


Figura 3. Cinética de adsorción de iones Ni(II) por la zeolita natural.

Al analizar los resultados experimentales se demostró que la cinética del proceso de adsorción de los iones Cu(II) y Ni(II) es descrito por el modelo de pseudo-segundo orden, como se muestra en las Figuras 4 y 5.

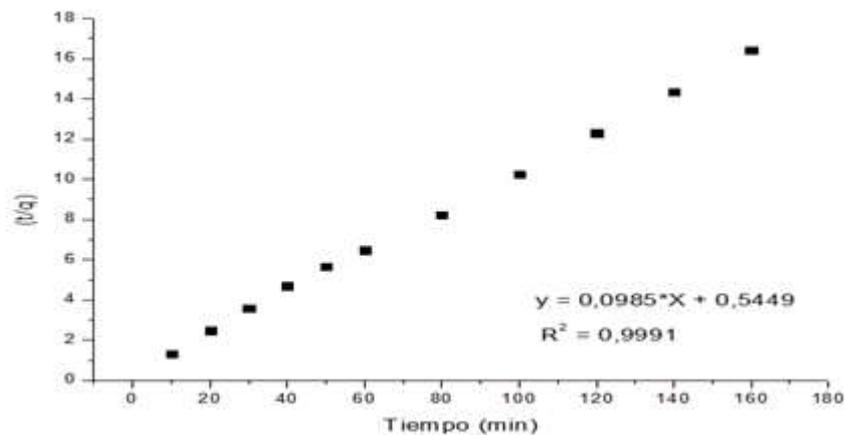


Figura 4. Modelo de pseudo-segundo orden para las soluciones de Cu(II).

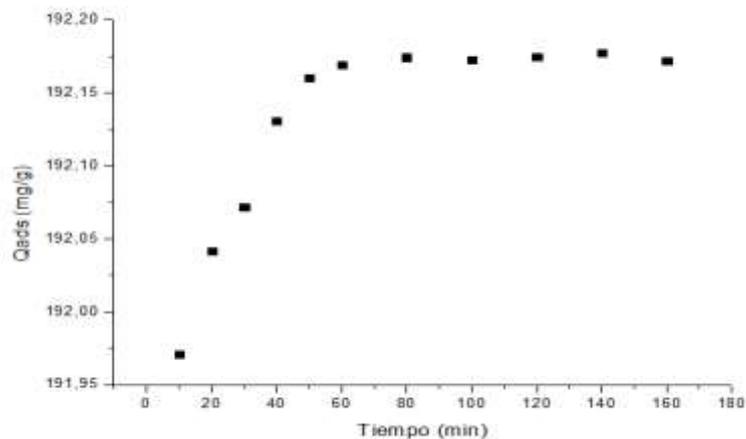


Figura 5. Modelo de pseudo-segundo orden para las soluciones de Ni(II).

Los resultados experimentales de los modelos cinéticos estudiados sobre el proceso de adsorción, indicados en la Tabla 3, muestran que el modelo de

pseudosegundo orden describe con exactitud la adsorción del Cu(II) y el Ni(II) en la zeolita usada como adsorbente, lo cual es corroborado por los coeficientes de correlación alcanzados. Este resultado es similar a los obtenidos en otras investigaciones (Nibou, Barkat y Trari 2010; Malamis y Katsou 2013; Plazinski, Dziuba y Rudzinski 2013; Blanchard, Maunaye y Carbonel 2018) para la adsorción de los iones metálicos Cu(II) y Pb(II) en bentonita, caolín, zeolita naturales y modificadas.

Tabla 3. Parámetros de los modelos cinéticos estudiados

Modelos cinéticos	Parámetros del modelo		
		Cu(II)	Ni(II)
Modelo de pseudo-primero orden	Qads(exp)	9,7308	192,1694
	K_L (min)	0,3521	14142
	R^2	0,845	0,9246
Modelo de pseudo-segundo orden	Qads(exp)	9,7308	192,1694
	k_2	0,0178	0,4506
	R^2	0,9991	1
Modelo de segundo orden	A	0,0143	0,001
	B	0,1254	0,0052
	R^2	0,7877	0,56
Modelo de difusión intraparticular	K	0,2486	37,48
	C	7,0213	7193,7
	R^2	0,8935	0,7129

El análisis de los modelos de las isothermas de adsorción permitió comprobar que el correspondiente a Freundlich describe la adsorción de ambos iones en la zeolita natural, como se puede observar en las Figuras 6 y 7 y en la Tabla 4.

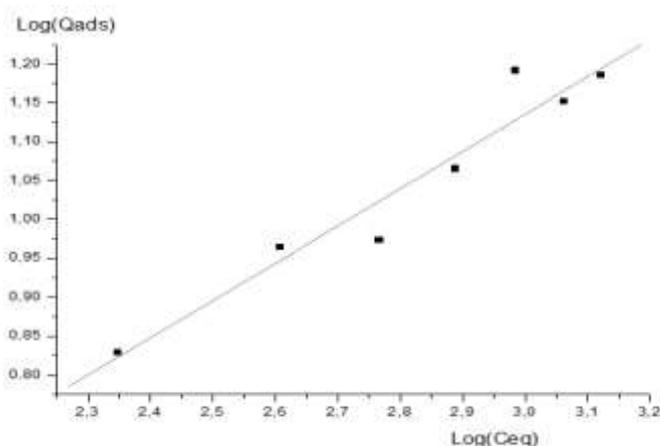


Figura 6. Isotherma de adsorción de Cu (II).

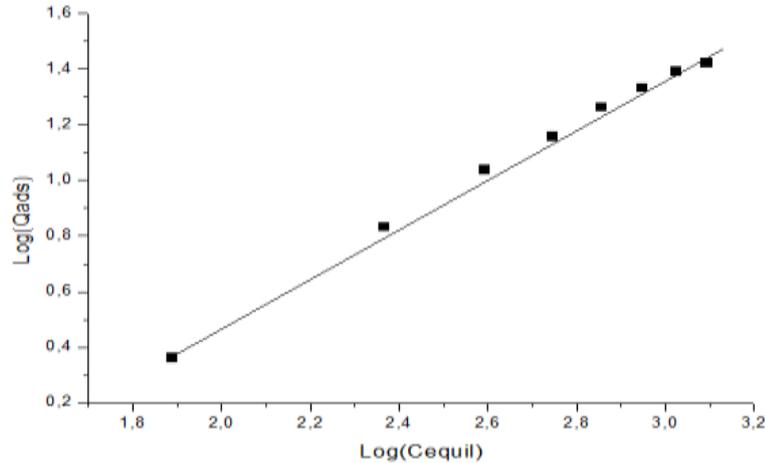


Figura 7. Isoterma de adsorción de Ni(II) en la zeolita.

Tabla 4. Parámetros de los modelos de adsorción ajustados

Modelos	Parámetros	Cu(II)	Ni(II)
Langmuir	N_m (mg/g)	22,148	90,09
	K_L	0,001657	0,000352
	R^2	0,954	0,974
Freundlich	$1/n$	2,080	0,918
	n	0,48	1
	K_F	0,497	0,053
	R^2	0,966	0,997

El coeficiente de regresión tomó valores de 0,966 para los iones de Cu(II) y 0,997 para los de Ni(II), revelando así que los modelos describen con exactitud el proceso de adsorción. Además, el valor del factor de separación (R_L) calculado para el rango de concentraciones inicial de cada ion seleccionado para realizar la investigación toma valor entre 0 y 1, demostrando que la adsorción en la zeolita es factible.

3.1. Isothermas de adsorción

Los máximos valores de adsorción para los iones Cu(II) y Ni(II) en el equilibrio son de 22,148 mg/g y 90,09 mg/g respectivamente, resultando elevados al ser comparados con los reportados en la literatura para la remoción de los iones Cu(II), Ni(II) y otros iones metálicos empleando diversos materiales adsorbentes (Basso y Cukierman 2001; Tejeda y Herrera 2014; Tapia 2017, 2018; Garrido *et al.* 2019; Pabón *et al.* 2020; Góngora y Sosa 2022). En el caso del Cu(II), este resultado es inferior a la bentonita sódica y al carbón activado, superior al caolín y la bentonita cálcica y similar al resto de los adsorbentes.

Tal comportamiento puede explicarse no solo por un intercambio de iones entre el material adsorbente y el adsorbato, sino también puede deberse a atracciones electrostáticas entre los grupos hidroxilos superficiales y la molécula hidrolizada con interacciones débiles por puentes de hidrógeno.

En la literatura especializada (Ahmet 2007) se reporta que los cationes multivalentes pueden ser adsorbidos sobre la superficie de un sólido a través de la salida de impurezas hacia la solución o producto de atracciones electrostáticas entre los grupos activos superficiales e incluso podría tener lugar un proceso de precipitación en el material, dependiendo del pH de la solución y la forma en que se presente el metal en dicho medio.

Los resultados demuestran que la zeolita presenta una capacidad de remoción de 22,148 mg/g para el ion de Cu(II), similar a los reportados en otras investigaciones (Tapia *et al.* 2011) y 90,09 mg/g para el ion de Ni(II). Esto se debe a que en la superficie de la zeolita natural existen grupos superficiales Si-OH²⁺ (silanodios) los cuales intervienen directamente en la remoción de los contaminantes. Los silanodios son considerados grupos superficiales débilmente ácidos (Alkan 2001), pueden exhibir reacciones de intercambio iónico entre los iones hidronios (H₃O⁺) y los cationes multivalentes, en este caso Cu(II) y Ni(II) (Rodríguez *et al.* 2006).

La influencia del pH en el proceso de adsorción ha sido estudiada en investigaciones precedentes, en las que se ha concluido que durante el proceso hay disminución del pH de las soluciones y que a valores de pH bajos, la superficie del material adsorbente se carga positivamente incrementando la repulsión entre los iones metálicos y los grupos superficiales, sin embargo, a medida que se incrementa el pH del medio, la superficie del material se carga negativamente, disminuyendo la repulsión entre los grupos superficiales y los iones, aumentando gradualmente la remoción de los iones metálicos.

Experimentalmente se corroboró que los mejores resultados de remoción de Cu(II) se obtienen en el intervalo de 4 a 6 unidades de pH, y valor óptimo cuando el pH es de 5 unidades, coincidiendo con las condiciones de equilibrio de las soluciones acuosas, similar a los valores obtenidos (Ahmet *et al.* 2007) en la remoción de Cu(II) y Pb(II).

Otro aspecto muy importante es que en el proceso de adsorción del Cu(II) y Ni(II) no ocurre la precipitación de los respectivos hidróxidos de estas especies, ya que las concentraciones molares utilizadas en la investigación, son inferiores a las necesarias para alcanzar el pH de precipitación de los hidróxidos de cobre y níquel.

4. CONCLUSIONES

- El estudio cinético del proceso de adsorción de los iones Cu(II) y Ni(II) demuestra que se alcanza el estado de equilibrio a los 80 min y 60 min, respectivamente. El modelo cinético de pseudo-segundo orden describe el proceso de adsorción para ambas especies metálicas.
- La ecuación isoterma de adsorción de Freundlich describe la adsorción del Cu(II) y Ni(II) en la zeolita natural, con capacidades máximas de adsorción para el Cu(II) y Ni(II) de 22,148 mg/g y 90,09 mg/g, respectivamente.
- La zeolita natural puede utilizarse como adsorbente del Cu(II) y Ni(II) en las soluciones residuales, alcanzando los mejores resultados para un valor óptimo pH igual a 5 unidades.

5. REFERENCIAS

- Armas, P. y Calapaqui. V. 2022: Funcionalización y caracterización y de una zeolita para la remoción de cobre, plomo y cadmio presentes en medios acuosos. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Ahmet, S.; San, A.; Tuzen, M.; Citak, D. y Soylak, M. 2007: Adsorption characteristics of Cu(II) and Pb(II) onto expanded perlite from aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 148(1-2): 387-394.
- Alkan, M. D. 2001: Adsorption of Copper (II) onto Perlite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 243(2): 280-91.
- Azizian, S. 2004: Kinetic Models of Sorption a Theoretical Analysis. *Journal of colloid and Interface Science*, 276(1): 47-52.
- Basso, M. y Cukierman, L. 2001: Tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados mediante carbones activados obtenidos de un precursor renovable. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 5.
- Blanchard, G.; Maunaye, M. y Carbonel, D. 2018: Adsorción de Cadmio, Cobre y Plomo en Bentonita, Caolín y Zeolita Naturales y Modificadas: Una Revisión de los Parámetros de Operación, Isotermas y Cinética. *Ingeniería*, 23(3): 252-273.
- Cabrera, C.; Gabaldon, C. y Marzal, P. 2005: Sorption characteristics of heavy metal ions by natural zeolite. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 80(4): 477-481.
- Caviedes, D. I.; Delgado, D. R. y Olaya, A. 2016: Remoción de metales pesados comúnmente generados por la actividad industrial, empleando macrófitas neotropicales. *Producción+Limpia*, 11(2): 126-149. ISSN1909-0455. Consultado: 25/06/2020. Disponible en: <https://doi.org/10.22507/pml.v11n2a11>.
- Córdova, V. 2015: *Potencialidades de la zeolita natural del yacimiento de Palmarito de Cauto para el tratamiento de licores básicos que contienen cromo*. Tesis doctoral. Universidad de La Habana. 125 p.
- Coz, A. 2022: Remoción de iones cobre y cadmio en solución empleando un equipo de electrodesionización. Universidad Nacional del Callao.

- Estupiñan, A.; Sarmiento, D. y de Galvis, A. M. B. 1998: Remoción de cobre y níquel por intercambio catiónico con una Zeolita Natural. *Revista Colombiana de Química*, 27(1): 31-39.
- Garrido, M.; Sosa, M.; Ramírez, M.; Figueroa, P. y Fonseca, E. 2019: Remoción de iones hierro(II) en medio acuoso con una toba vítrea natural. *Revista Minería y Geología*, 35(2): 196-209. ISSN 1993 8012.
- Ghassabzadeh, H.; Mohadespour, A.; Torab-Mostaedi, M.; Zaheri, P.; Maragheh, M. G. y Taheri, H. 2010: Adsorption of Ag, Cu and Hg from aqueous solutions using expanded perlite. *Journal of hazardous materials*, 177(1-3): 950-955.
- Góngora, N. y Sosa, M. 2022: Intercambio iónico Ni(II) y Co(II) con la resina Amberlite IR 120 en soluciones modeladas. *Revista de Innovación Social y Desarrollo*, 2. Editorial Digital Universitaria de Moa.
- Ismadji, S.; Soetaredjo, F. E. y Ayucitra, A. 2015: *Clay Materials for Environmental Remediation*. Londres: Springer Cham.
- Kennedy, J. and Murthy, Z. V. P. 2010: Isotherm modeling and batch adsorber desing for the adsorption of Cu(II) on a clay containing montmorillonite. *Journal Applied Clay Science*, 50(3): 409-413.
- Leyva, R.; Castillo, M. A. S.; Sánchez, M. V. H. y Coronado, R. M. G. 2001: Remoción de metales pesados de solución acuosa por medio de clinoptilolitas naturales. *Revista Internacional de contaminación ambiental*, 17(3): 129-136.
- Malamis, S. y Katsou, E. 2013: A review on zinc and nickel adsorption on natural and modified zeolite, bentonite and vermiculite: Examination of process parameters, kinetics and isotherms. *Journal of Hazardous Materials*, 252: 428-461.
- Martin, G. 1984: Removal of heavy metals from waters by means of natural zeolites. *Water Res*, 18(12): 1501-1508.
- Mishell, T.; Johama, V. y Ramirez, S. 2022: *Remoción de metales pesados a partir de soluciones acuosas mediante bioadsorbentes renovables de bajo costo*. Tesis de Licenciatura. UCE. Quito.
- Nibou, D.; Mekatel, H.; Amokrane, S.; Barkat, M. and Trari, M. 2010: Adsorption of Zn²⁺ ions onto NaA and NaX zeolites: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Journal of Hazardous materials*, 173(1-3): 637-646.
- Pabón, S.; Benitez, R.; Sarria, J. y Gallo, J. 2020: Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27): 9-18.
- Plazinski, W.; Dziuba, J. y Rudzinski, W. 2013: Modeling of sorption kinetics: the pseudo-second order equation and the sorbate intraparticle diffusivity. *Adsorption*, 19(5): 1055-1064.
- Rodríguez, G.; Rodríguez, F. y Basa, P. 1997: Tratamiento del licor carbonato-amoniaco C1 de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara con el licor residual del cooler de la Empresa Moa Nickel S.A. *Minería y Geología*, 14(2): 65.

- Rodríguez, M. 2016: *Evaluación de la capacidad de adsorción de NH_4^+ , y metales pesados Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} y Mn^{2+} empleando zeolitas naturales y sintéticas*. Tesis doctoral. Universidad Nacional de San Agustín. Perú.
- Rodríguez, I.; Petranovskii, V.; Castillon, F. F. and Farias, M. H. 2006: Effect of the Zn (II) on the reduction of Cu(II) in natural clinoptilolite. *Optical Materials*, 29: 105-109.
- Tapia, P.; Pavez, D.; Santander, M.; Aguilar, C. y Miranda, H. 2011: Utilización de una zeolita, natural en la sorción de iones cobre. *Revista de la Facultad de ingeniería*, 25(1): 62-69.
- Tapia, P.; Pavez, O.; Sant, M. y Sepulveda, B. 2017: Remoción de iones cobre con sorbentes orgánicos. *Holos*, 8: 42-55.
- Tapia, P.; Pavez, O.; Garrido, N. y Sepúlveda, B. 2018: Remoción de iones cobre y níquel con cáscara de mani. *Holos*, 3: 57-69.
- Tejeda, C. y Herrera, A. 2016: Utilización de bioadsorbentes para la remoción de níquel y plomo en sistemas binarios. *Ciencia en desarrollo*, 7(1): 31-36. ISSN 0121-7488.
- Zamzow, H, J. 1990: Removal of Heavy metals and other cations from waste water using zeolites. *Separation Science and Technology*, 25: 1555-1569.

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores no tienen conflictos de intereses que declarar

Contribución de los autores

MGR: idea del estudio, experimentos, interpretación de los resultados, redacción del original y revisión y corrección de la versión final. MSM: parte experimental, interpretación de los resultados, revisión y corrección de la versión final, corrección y actualización de la bibliografía. AMP: acopio de información bibliográfica, interpretación de resultados y aprobación de la versión final.

ORCID

MGR, <https://orcid.org/0000-0002-7174-9452>

MSM, <https://orcid.org/0000-0001-6980-4021>

AMP, <https://orcid.org/0000-0002-0367-3054>

Recibido: 15/09/2022

Aceptado: 20/10/2022