



# Estudio cinético e isothermas de adsorción de Ni(II) y Zn(II) utilizando biomasa del alga *Chlorella sp.* inmovilizada

EDNA LILIAN SÁNCHEZ T.\*, MA. TERESA GARZA GONZÁLEZ\*, VERÓNICA ALMAGUER CANTÚ\*,  
ISABEL DEL CARMEN SÁENZ TAVERA\*\*, ADRIANA LIÑÁN MONTES\*\*

Los metales pesados se encuentran entre los contaminantes más tóxicos. Algunos, como el mercurio (Hg), cadmio (Cd), arsénico (As), cromo (Cr), talio (Tl), plomo (Pb), níquel (Ni) y zinc (Zn), constituyen una preocupación para el bienestar de los sistemas acuáticos y terrestres, y representan un riesgo para la salud de las personas que consumen productos con altos índices de estos metales en su constitución.<sup>1</sup>

Existen diferentes tecnologías que hacen frente a este tipo de desechos tóxicos (mediante la remoción de los iones que contienen), entre las que destacan: precipitación, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa, electrodiálisis y electrólisis.

Desafortunadamente, el alto costo de instalación y mantenimiento de dichas tecnologías impide adoptarlas en las pequeñas empresas mexicanas. En consecuencia, el sector productivo que trabaja con metales pesados sigue generando descargas acuosas de desecho altamente contaminantes.<sup>2</sup> Alternativamente, se han considerado métodos para la recuperación de metales pesados, basándose en materiales naturales de origen.<sup>3</sup>

Existen tres procedimientos biotecnológicos para el tratamiento de residuos líquidos con metales tóxicos: la precipitación extracelular, la ca-

pacitación de polímeros purificados y la bioadsorción.

La bioadsorción es una técnica que utiliza biomasa viva, muerta o inmovilizada para la remoción y recuperación de metales pesados a partir de disoluciones acuosas, y se puede considerar una alternativa a los métodos convencionales para el tratamiento de efluentes contaminados.

La mejor manera de valorar dos bioadsorbentes es a través de su isoterma de adsorción. Estas isothermas sólo se pueden comparar cuando se obtienen al mismo valor de pH, ya que la capacidad de adsorción de la biomasa varía al modificar este parámetro.<sup>4</sup>

Los metales pesados de sistemas acuáticos contaminados pueden ser removidos por algas fitoplanctónicas. La pared celular de algas presenta carbohidratos como pectinas, xilanas, mananas y ácido algínico, además de lípidos y proteínas, los cuales proveen sitios ligantes de iones metálicos. Estos compuestos crean áreas de alta afinidad para cationes metálicos monovalentes como Ag (I), divalentes como Hg (II), Pb(II), Cd(II) o trivalentes como Al(III), Fe(III) y Au(III), entre otros.

\*Laboratorio de Biotecnología, FCQ-UANL.

\*\*Laboratorio de Análisis Instrumental, FCQ-UANL.

Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León. CP 66400, México. e-mail: tgarza@fcq.uanl.mx

La pared celular de las algas puede bioadsorber metales reversiblemente y actuar de una forma similar a como lo hacen las resinas de intercambio iónico.<sup>5</sup>

Dada la importancia de los metales níquel y zinc, la variedad de aplicaciones, así como sus efectos ecológicos y económicos, existen estudios recientes enfocados a la adsorción y recuperación de éstos.

Diferentes tipos de biomazas microbianas se han utilizado para la remoción del  $\text{Ni}^{2+}$ , entre las que destacan: hongos como *Penicillium chrysogenum*;<sup>6</sup> levaduras como: *Saccharomyces cerevisiae*,<sup>7</sup> *S. cerevisiae*, *K. fragilis*, *Saccharomyces* sp., *Candida* sp., y *Pichia* sp.,<sup>8</sup> *Candida* sp. y con *Rhodotorula mucilaginosa*;<sup>9</sup> algas como *Chlorella sorokiana*,<sup>10</sup> por mencionar sólo alguna.

En la bibliografía consultada se reportan trabajos<sup>11-15</sup> sobre estudios de cinéticas y de isotermas de adsorción de los metales níquel y zinc, utilizando biomasa libre. Algunos investigadores<sup>10</sup> han experimentado con la biomasa inmovilizada, obteniendo mejores resultados que los mostrados con biomasa libre. Los sistemas de algas inmovilizadas se han utilizado para la remoción de metales tóxicos y para la recuperación de metales valiosos, entre los que se encuentran: AlgaSORB<sup>(16)</sup>, Sobex<sup>(3)</sup> y SpiSORB<sup>(17)</sup>.

Los dos modelos matemáticos más utilizados para describir una isoterma de adsorción son los de Freundlich y Langmuir.<sup>3</sup>

Estos modelos utilizan parámetros que reflejan la naturaleza del adsorbente y pueden emplearse para comparar el rendimiento del proceso de bioadsorción.

El objetivo de este trabajo es evaluar la calidad metalosorbente de la biomasa de *Chlorella* sp. inmovilizada en alginato de calcio, mediante la determinación de las isotermas, capacidad máxima y cinética de adsorción de níquel (II) y zinc (II), a fin de entender mejor el proceso de bioadsorción y obtener información útil para el escalamiento de este proceso en el tratamiento de aguas residuales

## Materiales y métodos

### Obtención de la biomasa de *Chlorella* sp.

Se preparó el medio de cultivo BG-11<sup>(18)</sup>, se distribuyó en matraces de 500mL y se esterilizó en autoclave durante 15 minutos a 15 lb/in<sup>2</sup> y 121°C

Cada matraz se inoculó con 5 mL de una suspensión de un cultivo puro de la cepa de *Chlorella* sp. Los matraces inoculados se mantuvieron a temperatura ambiente y en presencia de luz durante 20 días, para favorecer el crecimiento del microorganismo.

Trascurrido este periodo, el contenido de los matraces se filtró y la biomasa obtenida se lavó con una solución de NaCl a 0.85%.

### Inmovilización de la biomasa de *Chlorella* sp.

La biomasa del alga *Chlorella* sp. se mezcló, en relación 1:1 en masa, con una solución acuosa de alginato de sodio a 3%. Posteriormente, esta mezcla se colocó en una bureta de 50 mL y se hizo gotear en un matraz que contenía una solución de CaCl 0.1 M. De esta manera se obtuvo la biomasa inmovilizada, en alginato de calcio, en forma de pellets. Conjuntamente, se prepararon estándares de níquel(II) y zinc(II) en intervalos de concentración de 10-500 mg/L.

### Cinética de adsorción de níquel(II) y zinc(II)

Los experimentos de la cinética adsorción de Ni(II) y Zn(II) se realizaron colocando diez pellets de la biomasa inmovilizada en un tubo de ensayo con 10 mL de la solución del metal correspondiente. Esto se realizó para nueve soluciones, en un intervalo de concentraciones de 10 a 500 mg/L de cada metal. Cada solución se ajustó a pH 5 antes de realizar estos experimentos. Los tubos de ensayo de los experimentos de adsorción se mantuvieron en agitación e intervalos de tiempo de 0.5 a 120 minutos. Posteriormente se filtraron las muestras, y los filtrados se analizaron por la técnica de es-

pectroscopia de absorción atómica (AAS) para determinar la concentración de metal. Todos los experimentos de adsorción se realizaron por triplicado a una temperatura de 25°C.

Se calculó la capacidad de adsorción con la ecuación (1):

$$q_t = \frac{(C_{inicial} - C_{residual}) V (\text{litros})}{g \text{ de biomasa}} \quad (1)$$

donde  $q_t$  es la capacidad de adsorción en un tiempo determinado (mg de metal/ g de biomasa),  $V$  es el volumen de muestra utilizada (L) y  $C$  representa la concentración de metal mg/L.

### Adsorción de Ni(II) y Zn(II)

Los experimentos de adsorción de metales se realizaron colocando diez pellets de la biomasa inmovilizada en un tubo de ensayo con 10 mL de la solución del metal correspondiente. Esto se realizó para nueve soluciones en un intervalo de concentraciones de 10 a 500 mg/L de cada metal. Cada solución se ajustó a pH 5 antes de realizar estos experimentos. Los tubos de ensayo de los experimentos de adsorción se mantuvieron en agitación durante dos horas, después se separó la biomasa de la solución del metal y se conservó la biomasa en otro tubo de ensayo para los experimentos de desorción. Las soluciones de metal se analizaron con la técnica de espectroscopia de absorción atómica (AAS). Todos los experimentos de adsorción se realizaron por triplicado a una temperatura de 25°C.

Se ajustaron los datos experimentales a los modelos matemáticos de Freundlich y Langmuir (2) y (3).

Freundlich

$$q = K C_e^{1/n} \quad (2)$$

donde  $q$  es la capacidad de adsorción (mg/g);  $C_e$  es la concentración de equilibrio (mg/L);  $K$  es el parámetro de la ecuación (L/mg) relacionado con

la afinidad del bioadsorbente por los iones metálicos y  $n$  es el parámetro de la ecuación relacionado con la intensidad de la adsorción.

Langmuir

$$q = \frac{q_{max} b C_e}{1 + b C_e} \quad (3)$$

donde  $q$  es la capacidad de adsorción (mg/g);  $C_e$  es la concentración de equilibrio (mg/L);  $q_{max}$  es la capacidad máxima de adsorción (mg/g) y  $b$  el parámetro de la ecuación (L/mg).

### Desorción de Ni(II) y Zn(II)

Los experimentos de desorción de metales se realizaron a partir de los pellets de biomasa usados en los experimentos de adsorción. A los pellets de biomasa se les añadieron 10 mL de una solución acuosa de HCl 0.1 M, y se mantuvieron en agitación durante dos horas. Posteriormente se separó la biomasa y la solución se conservó para ser analizada por la técnica de espectroscopia de absorción atómica.

El porcentaje de desorción de los iones  $Ni^{2+}$  y  $Zn^{2+}$  de la biomasa del alga *Chlorella* sp. se calculó de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\% \text{ desorción} = (C_f / C_i) \times 100$$

donde  $C_f$  es la concentración del metal en la fase acuosa en el equilibrio de desorción y  $C_i$  es la concentración del metal sorbida.

## Resultados y discusión

En la figura 1 se presenta el gráfico de la cinética de remoción de níquel (II) y zinc (II), utilizando biomasa del alga *Chlorella* sp. inmovilizada en alginato de calcio. Se observa que la cantidad residual de ambos metales desciende cuanto mayor es el tiempo de contacto metal-biomasa. No obstante, conforme la biomasa se va saturando

del metal, la velocidad de bioadsorción disminuye, alcanzándose el equilibrio de bioadsorción de níquel, a los 40 minutos y el de zinc a los 80 minutos. Los resultados obtenidos en la cinética sugieren que el proceso de bioadsorción se realiza en dos etapas, una rápida, de 0 a 20 min. y una lenta, de 30 a 120 min.

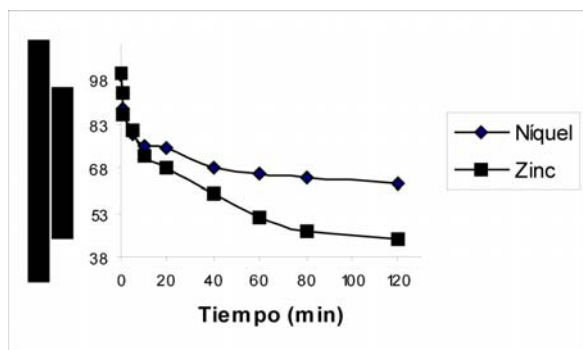


Fig. 1. Variación de la concentración de níquel(II) y zinc(II), con respecto al tiempo durante el proceso de bioadsorción de disoluciones de 100 mg/L del metal, utilizando diez pellets de biomasa del alga *Chlorella* sp. inmovilizada en alginato de calcio, (n=3).

En la figura 2 se muestran gráficos de la variación de las capacidades de adsorción para níquel y zinc. Se observa que, para ambos metales, la mayor capacidad de adsorción se logra a los 120 minutos.

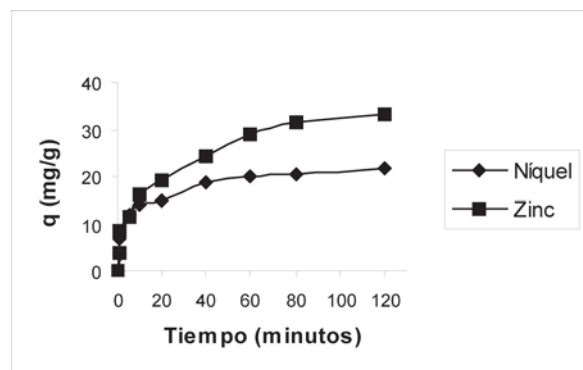


Fig. 2. Variación de la capacidad de adsorción de Ni(II) y Zn(II), con respecto al tiempo, durante el proceso de bioadsorción de disoluciones de 100 mg/L del metal, utilizando diez pellets de biomasa del alga *Chlorella* sp. inmovilizada en alginato de calcio, (n=3).

Los procesos de bioadsorción están dados por una ecuación de segundo orden:<sup>15,19</sup>

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_{2ad}q_m^2} + \frac{1}{q_m}t \quad (4)$$

$$q_t = \frac{q_m^2 kt}{1 + q_m kt} \quad (5)$$

$$\frac{t}{q} = \frac{1}{k_m q_m^2} + \frac{1}{q_m}t \quad (6)$$

en donde  $k_m$  es la constante de velocidad de adsorción [g/(mg\*min)] y  $q_m$  la máxima capacidad de adsorción.

Utilizando (6) se obtuvo la variación  $t/q$  en el proceso de bioadsorción. En la figura 3 se presenta la gráfica lineal de modelo matemático de la ecuación de segundo orden. Se logra apreciar una tendencia ascendente en la relación  $t/q$  para las cinéticas de níquel y zinc, se observaron, en ambos casos, coeficientes de correlación superiores a 0.9848, mientras que las desviaciones estándar promedio son inferiores a 0.05. En general, los datos indican que el proceso sigue una cinética de segundo orden.

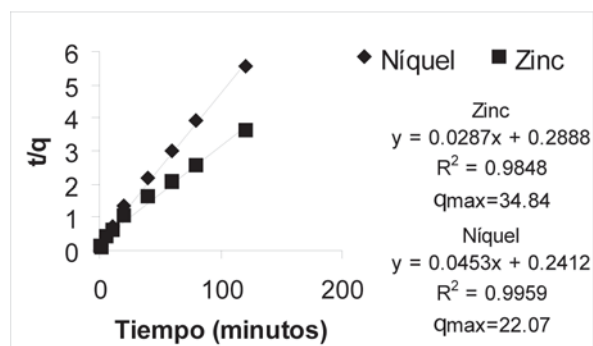


Fig. 3. Relación  $t/q$ , respecto al tiempo del proceso de bioadsorción de disolución de 100mg/L de níquel y zinc, utilizando diez pellets de biomasa del alga *Chlorella* sp. inmovilizada en alginato de calcio, (n=3).

La ecuación de Freundlich (7) se utiliza en su forma lineal para el análisis de los datos experimentales; para este modelo, el parámetro se relaciona con la afinidad del bioadsorbente por los

iones metálicos, mientras que  $n$  es un parámetro empírico que varía con el grado de heterogeneidad,  $C_e$  es la concentración de metal en el equilibrio y  $q$  representa la capacidad de adsorción

$$\log q = \frac{1}{n} \log C_e + \log K \quad (7)$$

El modelo de Langmuir (8) también se utiliza en su forma lineal para el análisis de los datos experimentales. En este modelo, el parámetro  $q_{\max}$  representa la capacidad de adsorción máxima del metal por la biomasa, este valor corresponde a la formación de una monocapa sobre la superficie de la biomasa, y el parámetro  $b$  refleja la afinidad del bioadsorbente por los iones metálicos.

$$\frac{C_e}{q} = \frac{1}{bq_{\max}} + \frac{C_e}{q_{\max}} \quad (8)$$

Las tablas I y II muestran los resultados de los experimentos de adsorción de Ni(II) y Zn(II), respectivamente, así como los valores calculados de la capacidad de adsorción del metal correspondiente por la biomasa del alga *Chlorella* sp.

Tabla I. Resultados de los experimentos de adsorción de Ni(II) en la biomasa del alga *Chlorella* sp. inmovilizada en alginato de calcio.

C inicial (mg/L)	C.de equilibrio media (mg/L)	q (mg/g)media
12.6	5.85±0.0700	3.98
21.3	10.68±0.0340	6.24
43.3	22.80±0.0190	12.13
88.4	52.86±0.0110	20.98
106.7	68.49±0.0066	22.55
212.5	152.96±0.0017	35.13
325.2	253.95±0.0023	52.03
438.1	354.98±.00008	60.07
517.7	405.63±0.0004	66.17

Asimismo, las tablas I y II muestran que la capacidad de adsorción para una concentración inicial dada de ión metálico es mayor para Zn(II) que para Ni(II).

La figura 4 muestra la isoterma de adsorción

Tabla II. Resultados de los experimentos de adsorción de Zn(II) en la biomasa del alga *Chlorella* sp. inmovilizada en alginato de calcio.

C. inicial (mg/L)	C.de equilibrio (mg/L) media	q(mg/g) media
10.8	2.64±0.0650	4.18
22.7	6.95±0.0063	8.07
40.9	11.73±0.0084	14.96
81.9	30.07±0.0006	26.61
103.6	43.97±0.0114	30.55
201.2	85.42±0.0114	59.35
300.9	147.59±0.0040	88.66
400.8	179.51±0.0037	113.52
503.5	255.82±0.0035	126.99

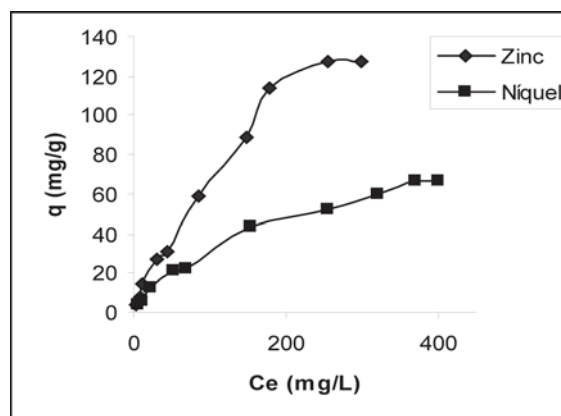


Fig. 4. Isotermas de adsorción de Ni<sup>2+</sup> y Zn<sup>2+</sup> utilizando diez pellets de biomasa del alga *Chlorella* sp. inmovilizada en alginato de calcio, en disoluciones de concentración inicial de 10 a 500 mg/L a pH 5, temperatura de 25°C, 2 h de contacto, agitación 120 r.min<sup>-1</sup>, (n=3).

de Ni<sup>2+</sup> y Zn<sup>2+</sup> por la biomasa del alga *Chlorella* sp. inmovilizada en alginato de calcio.

En esta figura se observa que la cantidad de metal adsorbido por cierta cantidad de biomasa se incrementa rápidamente al aumentar la concentración de metal, pero conforme la superficie de la biomasa se va cubriendo con el metal, la sorción se hace más lenta, alcanzando una máxima capacidad de adsorción de 66.16 mg/g para níquel y 126.9 mg/g para zinc.

Las figuras 5 y 6 muestran la variación de la capacidad de adsorción  $q$  (mg del metal/g biomasa), con respecto a la concentración residual

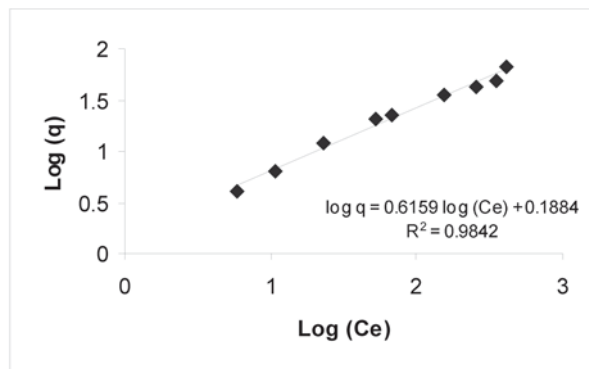


Fig. 5. Forma lineal de la ecuación de Freundlich para la adsorción de Ni<sup>2+</sup>.

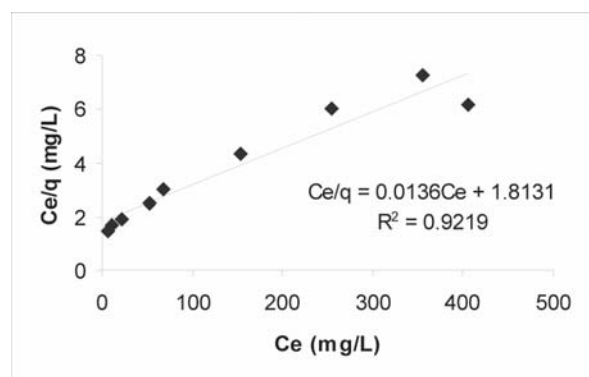


Fig. 6. Forma lineal de la ecuación de Langmuir para la adsorción de Ni<sup>2+</sup>.

ajustada a los modelos de las isoterma de Freundlich y Langmuir (7) y (8), así como la ecuación lineal de regresión, correspondiente a los datos de la bioadsorción de Ni<sup>2+</sup> por la biomasa del alga *Chlorella* sp. inmovilizada en alginato de calcio. Se advierte que el modelo de Freundlich se ajusta mejor, de acuerdo al coeficiente de correlación mostrado en ambas figuras, para la ecuación lineal de Freundlich,  $r^2=0.9842$ .

Las figuras 7 y 8 muestran las ecuaciones lineales de Freundlich y Langmuir, así como la ecuación lineal de regresión, correspondiente a los datos de la bioadsorción de Zn<sup>2+</sup> por la biomasa del alga *Chlorella* sp. inmovilizada en alginato de calcio. Se sugiere que el modelo de Freundlich se ajusta mejor a los datos experimentales, de acuerdo al coeficiente de correlación mostrado en ambas figuras, para la ecuación lineal de Freundlich,  $r^2= 0.9946$ .

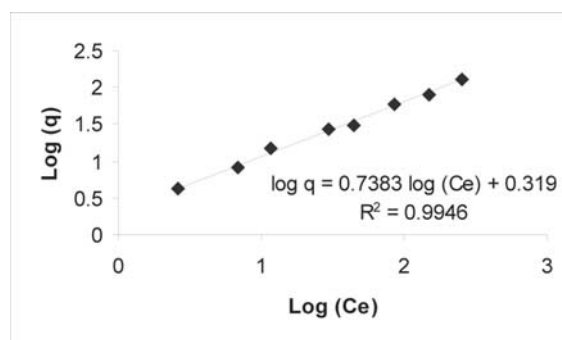


Fig. 7. Forma lineal de la ecuación de Freundlich para la adsorción de Zn<sup>2+</sup>.

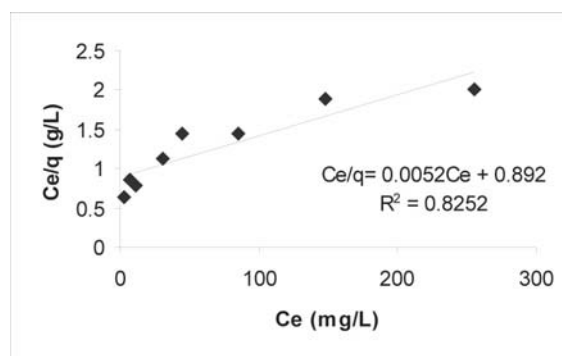


Fig. 8. Forma lineal de la ecuación de Langmuir para la adsorción de Zn<sup>2+</sup>.

Tabla III. Resultados de bioadsorción de Ni<sup>2+</sup> y Zn<sup>2+</sup>.

Modelo	Metal	$K$	$n$	$r^2$
Freundlich	Zinc	2.084	1.35	0.9946
Freundlich	Níquel	1.54	1.62	0.9842

Tabla IV. Resultados de los experimentos de desorción del ión Ni<sup>2+</sup> de la biomasa del alga *Chlorella* sp. inmovilizada en alginato de calcio.

C. del metal sorbido (mg/L)	C. media de Ni <sup>2+</sup> en el equilibrio (mg/L)	% de metal recuperado
6.747±0.07	4.642±0.050	68.805
10.576±0.034	7.331±0.026	69.320
20.558±0.019	12.479±0.033	60.703
35.56±0.011	32.704±0.011	91.971
38.218±0.0066	37.389±0.014	97.833
59.537±0.0017	57.540±0.01	96.646
71.247±0.0023	68.372±0.0044	95.966
83.178±.00008	80.520±0.0074	96.805
112.155±0.0004	109.486±0.0036	97.459

Los resultados para la bioadsorción de Ni<sup>2+</sup> y Zn<sup>2+</sup> se resumen en la tabla III.

En relación al equilibrio de adsorción descrito por el modelo de Freundlich, los valores de K y n (constantes de Freundlich), relacionados con la afinidad del bioadsorbente por los iones metálicos y la intensidad de adsorción, demuestran una afinidad de la biomasa zinc-níquel, puesto que se obtuvieron valores de n más altos de 1.0, la fuerza de la adsorción del metal por el bioadsorbente es intensa,<sup>20</sup> se observaron resultados similares en

Tabla V. Resultados de los experimentos de recuperación del ion Zn<sup>2+</sup> de la biomasa del alga *Chlorella* sp. inmovilizada en alginato de calcio.

C. del metal sorbido (mg/L)	C media de Zn <sup>2+</sup> en el equilibrio (mg/L)	% de metal recuperado
8.1±0.0650	7.30±0.0085	89.7
15.7±0.0063	13.66±0.0010	86.8
29.2±0.0084	26.03±0.0030	89.2
51.8±0.0006	50.26±0.0008	96.9
59.6±0.0114	56.80±0.0044	95.4
115.7±0.0114	108.34±0.0017	93.6
153.4±0.0040	127.52±0.0007	83.1
221.3±0.0037	184.44±0.0021	83.3
247.6±0.0035	228.61±0.0009	92.3

estudios anteriores, en los que utilizaron algas marinas como adsorbentes.<sup>14,21</sup>

Las tablas IV y V representan el porcentaje de desorción de los iones Ni<sup>2+</sup> y Zn<sup>2+</sup> de la biomasa del alga *Chlorella* sp.

Los resultados muestran una alta recuperación de níquel(II), siendo más eficiente a concentraciones altas, lo cual puede deberse a que el metal se une con menos fuerza a medida que se va saturando la superficie de la biomasa .

Los porcentajes de desorción medios fueron de 86.16% para Ni<sup>2+</sup> y de 90.021% para Zn<sup>2+</sup>. Estos resultados indican que es factible un proceso de recuperación de los metales adsorbidos en la biomasa, utilizando HCl.<sup>14,22,23</sup>

## Conclusiones

El estudio cinético revela dos procesos, uno rápido

en los primeros cinco minutos de contacto metal-biomasa, y otro lento en donde la velocidad de adsorción decrece hasta alcanzar el equilibrio a los 40 y 80 minutos para níquel y zinc, respectivamente

La mayor velocidad de adsorción para ambos casos se presenta en el primer minuto de contacto metal-biomasa.

El orden de reacción que describe la remoción de níquel(II) y zinc(II) mediante el bioadsorbente estudiado corresponde a un patrón de cinética de segundo orden.

La capacidad máxima de adsorción de Ni(II) y Zn(II) de la biomasa estudiada obtenida de las isotermas experimentales de adsorción fue de q= 66.167 mg/g y q=126.991 mg/g, respectivamente. Los resultados son superiores a los reportados en bibliografía consultada.

De los dos modelos estudiados para describir una isoterma de adsorción, el de Freundlich se ajustó mejor a los datos experimentales, obteniendo un coeficiente de afinidad mayor para zinc. Zn(II) K=2.084 y para Ni(II) K=1.54

Los iones Ni y Zn adsorbidos sobre la superficie de la biomasa *Chlorella* sp. inmovilizada en alginato de calcio puede ser recuperados, utilizando HCl 0.1 M. Los porcentajes de recuperación van de 60 a 97% para Ni<sup>2+</sup> y de 83 a 96% para Zn<sup>2+</sup>.

La biomasa de *Chlorella* sp. inmovilizada presenta ventajas sobre otros biosorbentes, es inodora, presenta durabilidad, facilidad de operación, gran capacidad de adsorción y alto % de recuperación del níquel y zinc.

## Resumen

En el presente estudio se determinó la capacidad de bioadsorción de níquel(II) y zinc(II) por la biomasa del alga *Chlorella* sp. inmovilizada en alginato de calcio. También se determinó la cinética de bioadsorción, así como la influencia de la concentración de los metales. Los resultados fueron tratados con los modelos de isotermas

de adsorción. Los datos de la cinética de bioadsorción correspondieron a una reacción de segundo orden. Las isothermas experimentales de adsorción se ajustaron mejor al modelo de Freundlich. De acuerdo a este modelo, la  $q_{\max}$  de la biomasa fue 66.16 mg/g para níquel(II) y 126.9 mg/g para zinc(II). Los metales adsorbidos fueron satisfactoriamente recuperados con HCl 0.1 M.

**Palabras clave:** Bioadsorción, *Chlorella* sp., Isothermas de adsorción, Freundlich, Langmuir, Metales pesados.

## Abstract

In the present study, the biosorption capacity of *Chlorella* sp. biomass immobilized in calcium alginate for Ni (II) and Zn (II), from aqueous solutions, was investigated by batch experiments. The kinetic of biosorption was also investigated. The influence of metal ion concentration was evaluated and the results were fitted using adsorption isotherm models. Predictions based on the second order rate expression were found in satisfactory accordance with experimental data. The biosorption followed the Freundlich isotherm model. According to the Freundlich isotherm model, the maximum adsorption capacity of the biomass was 66.16 mg/g for nickel(II) and 126.9 mg/g for zinc(II). The nickel(II) and zinc (II) adsorbed could be desorbed effectively by HCl 0.1 M.

**Keywords:** Biosorption, *Chlorella* sp., Adsorption isotherms, Freundlich, Langmuir, Heavy metals.

## Agradecimientos

El presente trabajo se realizó en el Laboratorio de Biotecnología de la Facultad de Ciencias Químicas, con recursos aportados por el Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica de la UANL (Paicyt) 2006, clave CA 1301-06.

## Referencias

- Gadd, G. M. (1990). Biosorption. *Chemistry and Industry*. 13: 421-426.
- Davis T. A., Volesky B., Mucci A. (2003). Biochemical analysis of the bioadsorción of heavy metals for brown algae. *Water Res.* 37:4311-4330.
- Volesky, B. (1999). Biosorption for the next century. Chemical Engineering Department. Mc Gill University, Canadá. Ed. CRC PRESS.
- Klimmek, S., Stan H. J., Wilke A., Bunke G., Bucholz, R. (2001). Comparative analysis of the biosorption of cadmium, lead, nickel and zinc by algae. *Environ. Sci. Technol.* 35(21): 4283-4288.
- Darnall, D. W., Greene, B., Henzl, M. T., Hosea, J.M., Mc Pherson, R. A., Alexander, M. D. (1986). Selective recovery of gold and other metal ions from algae biomass. *Environ. Sci. Technol.* 20(2): 206-208.
- Su, H., Wang, Z., Tan, T. (2003). Adsorption of Ni<sup>2+</sup> on the surface of molecularly imprinted adsorbent from *Penicillium chrysogenum* mycelium. *Biotechnol. Lett.* 25(12):949-53.
- Jianlong, W., Chen, C. (2006). Biosorption of heavy metals by *Saccharomyces cerevisiae*: A review *Biotechnol. Advances.* 24:427-451
- Podgorskii, V. S., Kasatkina, T. P., Lozovai, O. G. (2004). Yeasts biosorbents of heavy metals *Mikrobiol Z.* 66(1): 91-103.
- Villegas, L. B., Amoroso, M. J., de Figueroa, L. I. (2005). Copper tolerant yeasts isolated from polluted area of Argentina. *J. Basic. Microbiol.* 45(5):381-91.
- Akhtar, N., Iqbal, J., Iqbal, M. (2004). Removal and recovery of nickel(II) from aqueous solution by loofa sponge-immobilized biomass of *Chlorella sorokiniana*: characterization studies; *J Hazard Mater.* 108(1-2):85-94.
- Kalyani, P. S., Srinivasa, Rao and Krishnaiah,



- A. (2004). Removal of nickel (II) from aqueous solutions using marine macroalgae as the sorbing biomass. *Chemosphere*. 57(9): 1225-1229.
12. Vijayaraghavan, K., Padmesh, T.V., Palanivelu, K., Velan, M. (2006). Biosorption of nickel(II) ions onto *Sargassum wightii*: Application of two-parameter and three-parameter isotherm models. *J Hazard Mater*.133(1-3):304-8
  13. Loukidou, M.X., Zouboulis, A.I., Karapantios, T.D., Matis. K.A. (2004). Equilibrium and kinetic modeling of chromium(VI) biosorption by *Aeromonas caviae*, *Colloid Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.* 242 93-104.
  14. Tuzun, I., Bayramoglu, G., Yalcin, E., Basaran, G., Celik, G., Arica, M. Y.(2005). Equilibrium and kinetic studies on biosorption of Hg(II), Cd(II) and Pb(II) ions onto microalgae *Chlamydomonas reinhardtii*. *J. Environ. Manage.*77(2):85-92.
  15. Volpe A, Lopez A, Pagano M. (2003). Olive husk: an alternative sorbent for removing heavy metals from aqueous streams. *Appl Biochem Biotechnol.* 110(3):137-49.
  16. Kuyucak, N. (1990). Feasibility of biosorbents application, In: *Biosorption of Heavy Metals*, Volesky B., (Ed) CRC Press , Boca Ratón, Florida , pp 372-377.
  17. Vannela, R. y Verma, K.S. Cu<sup>2+</sup> (2006). Removal and recovery by Spi SORB: batch stirred and up-flow packed bed columnar reactor systems. *Bioprocess Biosyst Eng.* 29:7-17.
  18. Demain A.L., Solomon N.A., (1986). *Manual of industrial microbiology and technology*. A. S. M., Washington DC.
  19. Cordero B., Lodeiro P., Herrero R., Sastre de Vicente M.E., 2004. Biosorción de cadmio por *Fucus spiralis*. *Environ Chem.* 1: 180-187
  20. Ozer, A., Ozer, D. (2003). Comparative study of the biosorption of Pb(II), Ni(II) and Cr(VI) ions onto *S. cerevisiae*: Determination of biosorption heats. *J. Hazard Mater.* 100(1-3):219-29.
  21. Ofer, R., Yerachmiel, A., Shmuel, Y. (2003). Marine macroalgae as biosorbents for cadmium and nickel in water. *Water Res.* 37(3):627-33.
  22. Jalali, R. (2002). Removal and recovery of lead using nonliving biomass of marine algae. *J Hazard Mater.* 92(3):253-62.
  23. Hamdy, A. (2004). Biosorption of heavy metals by marine algae. *Environ Technol.* 25(10):1097-106

*Recibido: 3 de agosto de 2007*

*Aceptado: 15 de octubre de 2007*