



## Estudio Isotèrmico de Biosorción de Níquel en soluciones acuosas sintéticas utilizando biomasa seca del alga *Chlorella sp*

Campo Romero Domingo A<sup>1</sup>,Rodríguez Martinez Raúl<sup>2</sup>,Chaparro G.Amanda L<sup>1</sup>,  
Roa P. Alba L<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Básicas. Departamento de Química y Biología. Universidad de Pamplona. Colombia

<sup>2</sup>Laboratorio de Biotecnología, Grupo de Investigación en Recursos Naturales,Universidad de Pamplona. Colombia

### Resumen

La contaminación causada por elementos potencialmente tóxicos (EPTs) en fuentes hídricas, es una problemática ambiental de gran importancia e interés mundial debido a las continuas descargas de residuos de origen antropogénicos al ambiente acuático. Uno de los métodos biológicos que resultan atractivos en la remoción de metales es la biosorción, la cual es más económica, efectiva y amigable con el medio ambiente si se compara con métodos físico-químicos. En el presente estudio se determinó la capacidad de bioadsorción de Ni (II) de soluciones acuosas sintéticas por la biomasa seca del alga *Chlorella sp*. También se realizó la cinética de bioadsorción, así como la influencia de la concentración inicial del metal. Se aplicaron los modelos de Freundlich y Langmuir para describir las isotermas de adsorción. Las isotermas experimentales de adsorción se ajustaron mejor al modelo de Freundlich ( $R^2= 0,999$ ). La capacidad máxima de bioadsorción ( $Q_{max}$ ) de la biomasa fue de 32,701 mg/g a temperatura ambiente 19 +/- 0,2°C y pH de la solución metálica. Por otro lado, el análisis FTIR para los grupos funcionales de la superficie de la biomasa reveló la existencia de grupos carboxilos, hidroxilos, carbonilos y aminos, los cuales son responsables de la bioadsorción de Ni (II).

**Palabras clave:** Contaminación por níquel, Isotermas adsorción, biosorción, *Chlorella sp*.

### Abstract

The pollution caused by potentially toxic elements (EPTs) in water sources is a major environmental problems and global interest due to continuous waste discharges to the aquatic environment anthropogenic origin . One of the biological methods are attractive in metal removal is the biosorption, which is cheaper, more effective and friendly to the environment when compared with physicochemical methods. In this study we determined the ability of biosorption Ni (II) synthetic aqueous solutions by dry biomass alga *Chlorella sp*. The bioadsorción kinetics as well as the influence of the initial metal concentration was also performed. Freundlich and Langmuir models were applied for describing adsorption



isotherms. The experimental adsorption isotherms were fitted better to Freundlich model ( $R^2 = 0.999$ ). Biadsorption maximum capacity ( $Q_{max}$ ) of biomass was 32,701 mg / g at room temperature  $19 \pm 0.2$  °C and pH of the metal solution. Furthermore, the FTIR analysis the functional groups of the algal surface biomass revealed carboxyl groups, hydroxyls, carbonyls and amines, which are responsible for biosorption of Ni (II).

**Keywords:** Nickel contamination, adsorption isotherms, biosorption, *Chlorella* sp.

\*Para citar este artículo: Campo Romero D.A,Rodríguez Martínez R,Chaparro G.Amanda L , Roa P A L.Estudio Isotérmico de Biosorción de Níquel en soluciones acuosas sintéticas utilizando biomasa seca del alga *Chlorella* sp

+ Autor para el envío de correspondencia y la solicitud de las separatas: Rodríguez Martínez R.Facultad de Salud. Departamento de Bacteriología. email:rrodriguez@unipamplona.edu.co

Recibido: Enero 20 de 2013 Aceptado: Agosto 25 de 2013

## Introducción

Existen numerosas actividades realizadas por el hombre las cuales generan residuos que contienen níquel (*i.e.*, baterías, curtidos, galvanoplastia e impresión), el cual es descargado directamente a fuentes naturales sin ningún tratamiento previo. La peligrosidad de este elemento reside principalmente en que no es biodegradable, ya que tiene la capacidad de unirse con moléculas orgánicas y a su vez bioacumularse en diversos organismos vivos (CHICÓN, 2006). Esta bioacumulación se agrava a lo largo de las cadenas tróficas, y es en los seres humanos donde se presentan mayores riesgos a la salud, debido a que puede provocar retrasos en el desarrollo, distintos tipos de cáncer e incluso la muerte en casos de exposición a concentraciones muy altas (TURKER, 2012). Existen diferentes tecnologías que hacen frente a este tipo de desechos tóxicos, mediante la remoción de los iones que contienen, entre las que se destacan: precipitación química, coagulación química, oxidación, reducción, intercambio iónico, filtración, ultrafiltración, nanofiltración, adsorción (carbón activado, zeolitas, gel de sílice), tecnologías de membrana (ósmosis inversa), tratamiento electroquímico (electrodialisis y electrocoagulación) y aplicación de humedales artificiales (lagunas de estabilización), entre otros (NILANJANA *et al.*, 2008; WANG & CHEN, 2009; NAGPAL *et al.*, 2011). Sin embargo, algunas de estas tecnologías convencionales son a menudo ineficientes o costosas, especialmente

cuando son utilizadas para la reducción de iones de EPTs a concentraciones por debajo de los 100 ppm (PANPINI *et al.*, 2004; SARI & TUZEN, 2008; WANG & CHEN, 2009; NAGPAL *et al.*, 2011; WITEK-KROWIAK *et al.*, 2011; TURKER, 2012). En consecuencia, se siguen generando descargas acuosas de desechos con estos elementos altamente contaminantes (DAVIS *et al.*, 2003). Por lo tanto, es importante el desarrollo de nuevas tecnologías de detoxificación para dichos efluentes y que además estabilicen químicamente el compuesto (CAÑIZARES, 2000; DE PHILIPPIS *et al.*, 2011; KUMAR & OOMMEN, 2012; BUASRI *et al.*, 2012). De manera alternativa, se han considerado métodos biotecnológicos para la recuperación de EPTs, que emplean microorganismos y/o sus productos (*i.e.*, algas, bacterias u hongos), los cuales tienen la posibilidad de inmovilizar los metales en formas no biodisponibles y de esta manera convertir los iones metálicos en estados químicos más inocuos. Una de estas técnicas es la biosorción, en la cual se hace uso de materia viva, muerta o inmovilizada para la remoción de metales pesados y su posterior recuperación (IYER *et al.*, 2005; GOKSUNGUR *et al.*, 2005; TUNALI *et al.*, 2006; SANCHÉZ *et al.*, 2008; GUPTA & RASTOGI, 2009; ANAYURT *et al.*, 2009). Por otra parte, se ha descrito que la microalga *Chlorella* ha sido utilizada en diversos procesos: En el campo terapéutico para fortalecer el sistema inmunológico, acelerar la curación de heridas, estimular el crecimiento y reparación de tejidos, así como en la capacidad de desintoxicar al organismo



de EPTs como el Hg, el Cd y el Pb, presentes en insecticidas o plásticos (KUMAR & OOMMEN, 2012). En el área de la Biotecnología se ha usado como biosorbente de EPTs, ya que es capaz de incorporar grandes cantidades de metales como ( $\text{Cr}^{2+,3+,6+}$ ,  $\text{Fe}^{2+,3+}$ ,  $\text{Cu}^{1+,2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+,4+}$  y  $\text{Hg}^{1+,2+}$ ) por medio de absorción y acumulación (GRAHAM & WILCOX, 2000; SOLTMANN *et al.*, 2010).El objetivo de este trabajo fue evaluar la calidad metalosorbente de la biomasa seca del alga *Chlorella* sp., mediante la determinación de isothermas, capacidad máxima y cinética de adsorción de Ni (II), a fin de entender mejor el proceso de biadsorción y obtener información útil que permita aplicar en procesos de escalado para el tratamiento de aguas contaminadas con este metal.

#### METODOLOGÍA

##### Materiales y reactivos

Se preparó una solución a 1.000 ppm de Ni (II), utilizando  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$  grado analítico, marca Merck, con agua destilada y  $\text{HNO}_3$ , marca Merck 10 mL por cada litro de solución. Luego de esta solución madre se hicieron diluciones para preparar las distintas soluciones a las concentraciones requeridas, es decir a 5; 10; 20; 30; 40 y 50 ppm.

**Obtención de la biomasa de *Chlorella* sp.** Los parámetros más importantes que regulan el crecimiento de las algas son cantidad y calidad de nutrientes, luz, pH, turbulencia, salinidad y temperatura

(BARSANTI *et al.*, 2006). Para cumplir con los requerimientos nutricionales de *Chlorella* sp., se empleó el medio de cultivo Basal de Bold (BBM) (DEMAIN & SOLOMON, 1986). El medio de cultivo se distribuyó en matraces de 2 Litros y se esterilizó en autoclave durante 15 minutos a  $15\text{lb/in}^2$  y  $120^\circ\text{C}$ . Con el fin de producir biomasa de *Chlorella* sp por lotes, el medio de cultivo se adicionó a biorreactores de 2L y se inocularon con 10 mL de una suspensión de un cultivo puro de la microalga. Para favorecer el crecimiento del microorganismo, se mantuvo a temperatura ambiente  $19 \pm 2^\circ\text{C}$ ; pH de  $7 \pm 0.2$ ; fotoperiodo luz-oscuridad 12:12 con lámparas fluorescentes de 28 vatios y aireación suministrada con una bomba de acuario con un flujo de 0,5 L/min durante un periodo de 20 días. Pasado este tiempo, la biomasa obtenida se separó primero por decantación y después por filtración, se lavó con solución de NaCl 0,85% y se secó en una estufa a  $45^\circ\text{C}$  durante aproximadamente 5 horas.

**Caracterización mediante FTIR (Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier) de la biomasa seca de *Chlorella* sp.** La biomasa seca de *Chlorella* sp. fue caracterizada mediante espectroscopia infrarroja, utilizando el método de la pastilla de KBr, en un espectrofotómetro infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR SHIMADZU Prestige-21) en la región de  $400\text{-}4000\text{cm}^{-1}$ , a una resolución de  $4\text{cm}^{-1}$ . Este análisis permitió estimar la forma en que el ion Ni (II)



interacciona con los grupos representativos de la pared celular de la biomasa seca del alga *Chlorella* sp.

#### **Cinética de adsorción de Ni**

Los ensayos de la cinética de adsorción de Ni (II) se realizaron colocando 5 mg de biomasa en un matraz con 10mL de la disolución de 50ppm del metal a pH de la disolución. Los experimentos de adsorción se mantuvieron en agitación constante (120 rpm) e intervalos de tiempo de 0 a 120 minutos. Cumplidos los tiempos respectivos, las soluciones fueron filtradas y el sobrenadante fue analizado para determinar la concentración residual del metal.

#### **Isoterma de adsorción de Ni**

Para determinar la isoterma de adsorción de Ni sobre *Chlorella* sp. se prepararon diferentes soluciones de concentraciones iniciales de Ni (II): 5, 10, 20, 30, 40 y 50 mg/L. A un volumen de 10 mL de cada solución por triplicado, se le adicionaron 5 mg de biomasa y se dejó en agitación constante por 2 horas a 20°C. Las soluciones fueron filtradas y se midió la concentración final de Ni (II) en el filtrado o concentración en el equilibrio ( $C_e$ ). Se calculó la capacidad de adsorción de la biomasa seca del alga *Chlorella* sp. para cada solución y para el análisis de la isoterma de adsorción se recurrieron a los modelos matemáticos de Freundlich y Langmuir.

#### **Análisis de las muestras**

La determinación del ion Ni (II) se llevó a cabo por triplicado en los filtrados de los ensayos de biosorción mediante digestión ácida ( $\text{HNO}_3$ ) y su posterior análisis en un equipo de absorción atómica utilizando un equipo Thermo S Series AA Spectrometer, trabajando a una longitud de onda de 232nm, por el método de llama de acetileno-aire y lámpara de cátodo hueco.

#### **Análisis de datos**

Para el estudio de la cinética se obtuvo una serie de estadísticas descriptivas al conjunto de datos con el fin de evaluar el comportamiento y distribución. El estudio generó mediciones en seis tiempos diferentes para los cuales se midió el cambio en la concentración del metal. Una vez registrados los datos se construyó el perfil que generará el diagrama de puntos necesario para el posterior modelado a través de regresión lineal o no lineal según la naturaleza del perfil.

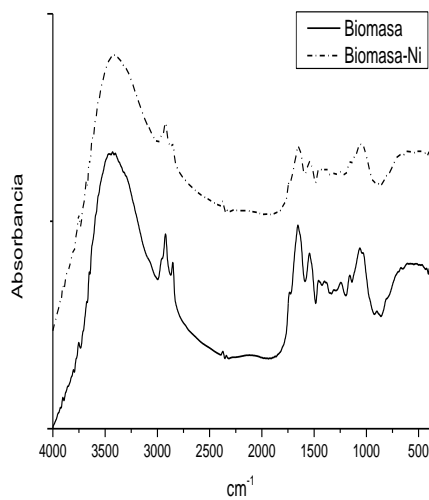
#### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**Obtención de la biomasa de *Chlorella* sp.** Transcurrido un periodo de 20 días, se obtuvo aproximadamente 0,8 gramos de biomasa seca por cada 2 L de medio nutritivo, es decir, 0,4 g/L. La biomasa se guardó en cajas de Petri a una temperatura de 4°C para los posteriores ensayos de biosorción.

#### **Caracterización mediante FTIR de la biomasa seca de *Chlorella* sp.**

Los resultados que se ilustran en la figura 1 muestran los espectros FTIR de

la biomasa seca del alga *Chlorella* sp. antes y después del proceso de bioadsorción. Estos resultados dan información sobre los grupos funcionales en la superficie de la pared celular de la biomasa y la posible interacción entre el Ni (II) y los grupos funcionales.



**Figura 1.** Espectro de FTIR de la biomasa seca del alga *Chlorella* sp. antes y después del proceso de bioadsorción.

En la tabla 1 se encuentran los principales grupos funcionales registrados en los espectros de IR y las frecuencias de bandas correspondientes a la biomasa antes y después del proceso de biosorción.

**TABLA 1.** Frecuencias de las bandas registradas en los FTIR por biomasa de *Chlorella* sp., antes y después de la bioadsorción de los metales.

Biomasa pura	Biomasa-Ni	Grupo funcional
3422	3426	-OH, N-H
2924	2924	CH <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub>
2857	2855	CH <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub>
1651	1655	C-O (amida)
1545	1543	C-N, N-H
1244	1244	C-O, C=C de anillo
1061	1059	C-O

Del análisis de los espectros de FT-IR, las principales frecuencias de bandas características incluyen: una amplia banda de 3000 a 3600  $\text{cm}^{-1}$ , el cual es el resultado de vibraciones de hidrógenos intermoleculares de los grupos OH y NH posibles a grupos fenólicos. Los hidrógenos del metileno ( $-\text{CH}_2-$ ) generaron dos bandas de estiramiento CH alifático; un fuerte pico en 2924  $\text{cm}^{-1}$  para el estiramiento asimétrico y un hombro en 2855  $\text{cm}^{-1}$  para el estiramiento simétrico. Un pico pronunciado a 1655 y 1543  $\text{cm}^{-1}$  podría atribuirse a  $-\text{C}=\text{C}-$  aromático, al grupo carbonilo C=O de cetonas o al estiramiento de amidas conjugadas (C=N). Por otro lado, la banda correspondiente a los 1059  $\text{cm}^{-1}$  se asigna a la vibración del grupo C-O proveniente del carboxilo del ácido algínico y del hidroximetilo de la celulosa de la pared celular del alga.

Todos los enlaces mencionados anteriormente que eran prominentes en la biomasa pura mostraron una degradación en su intensidad en el espectro de la biomasa-Ni. Hubo una disminución general en el contenido de proteínas y carbohidratos lo cual se



indica por una disminución en la intensidad de las bandas de absorción en la región de 800-1800  $\text{cm}^{-1}$  la cual es específica para estas macromoléculas. La declinación en la intensidad de absorción en el intervalo de 3100-2800  $\text{cm}^{-1}$  es indicativo de la disminución del contenido de lípidos. Por otro lado, los cambios en el número de onda de los picos más representativos después del proceso de biosorción indican que los grupos funcionales amino, hidroxilos, C=O y C-O de la superficie de la biomasa seca del alga *Chlorella* sp. participaron en la biosorción Ni (II). Basándose en el cambio de las bandas, es razonable suponer, que los valores de los picos sugiere un efecto quelante de la biomasa por el metal. Resultados similares se han reportado en la biosorción de especies metálicas haciendo uso de diferentes especies de algas (TAMER *et al.*, 2009; MAYER *et al.*, 2011).

### Cinética de adsorción de Ni

Los resultados de la adsorción de Ni (II) de soluciones acuosas sintéticas haciendo uso de la biomasa seca del alga *Chlorella* sp. se presentan en la figura 2.

Se observa que la concentración de Ni (II) residual disminuye a medida que pasa el tiempo de contacto metal-biomasa. Sin embargo, conforme la biomasa se va saturando del metal, la velocidad de adsorción disminuye, lográndose el equilibrio de adsorción de

Ni (II) a los 260 minutos y una concentración de níquel de 21,75 mg/L. Teniendo en cuenta este resultado de cinética, se puede argumentar que este proceso se lleva a cabo en dos etapas: una rápida, de 0 a 60 minutos y una lenta de 60 a 260 minutos.

Por otro lado, la figura 3 muestra la variación de la capacidad de adsorción de Ni (II). Se observa que la mayor capacidad de adsorción se logra a los 260 minutos. Este tiempo es en el cual todos los sitios de interacción metal-biomasa están ocupados, es decir, la biomasa está saturada y por ende se alcanza la máxima velocidad de adsorción.

### Isoterma de adsorción de Níquel

La determinación de la capacidad de adsorción del alga *Chlorella* spp. se basó en el balance de materia del sistema de adsorción, donde se asume que el Ni (II) que desapareció de la solución debe estar en la biomasa; por tanto, la cantidad límite de Ni (II) que desapareció de la solución puede ser calculada con la ecuación 1:

$$Q_s \left( \frac{\text{mg}}{\text{g}} \right) = \frac{(C_{\text{inicial}} - C_{\text{final}}) * V (\text{litros})}{g \text{ de biomasa}} \quad (1)$$

Donde  $Q_s$  es la capacidad de adsorción en un tiempo determinado (mg de metal/g de biomasa), V es el volumen de la muestra utilizada (L) y C representa la concentración de metal (mg/L). Se han desarrollado varios modelos para

cuantificar la capacidad máxima de adsorción de Ni (II) sobre la superficie del adsorbente, los cuales consisten en graficar la concentración de soluto [Ni(II)] en la fase sólida  $Q_e$ , en función de la concentración de Ni (II) en la fase líquida o concentración en equilibrio  $C_e$ . Debido a que los datos son obtenidos a una misma temperatura, la gráfica se llama isoterma de adsorción. La isoterma de Langmuir (2) se emplea en su forma lineal graficando  $1/Q_e$  vs  $1/C_e$ :

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{\alpha_L}{K_L} C_e + \frac{1}{K_L} \quad (2)$$

Una gráfica de  $\frac{C_e}{Q_e}$  en función de  $C_e$  produce una línea recta, si se cumple la ecuación 2, cuya pendiente es  $\frac{\alpha_L}{K_L}$  y el intersección  $\frac{1}{K_L}$ . El valor de  $\frac{K_L}{\alpha_L}$  corresponde a la capacidad de adsorción del sorbente (biomasa seca de *Chlorella* sp.) por el sorbato, Ni (II), y se expresa como  $Q_e$  o  $Q_{max}$ . Por otro lado el modelo de Freundlich está descrito por la ecuación 3.

$$Q_e = K C_e^{1/n} \quad (3)$$

Donde  $Q_e$  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. La ecuación de Freundlich (4) también se utiliza en su forma lineal para el análisis de los datos experimentales; para este modelo, el parámetro se relaciona con la afinidad del sorbente 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  $Q_e$  representa la capacidad de adsorción  $\log Q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K$  (4)

El estudio de la cinética de adsorción es útil en la evaluación de un adsorbente. La isoterma de adsorción permite observar como el soluto interactúa con el adsorbente y permite optimizar sus usos (BARAN *et al.*, 2006). La Tabla 2 muestra los resultados de los ensayos de adsorción de Ni (II), así como los valores calculados de la capacidad de adsorción del metal correspondiente por la biomasa seca del alga *Chlorella* sp.

La isoterma de adsorción obtenida en el presente estudio a pH 6,2 y temperatura de 20 °C, para la adsorción de Ni sobre biomasa seca del alga *Chlorella* sp., se muestra en la figura 4.

**Figura 4.** Isoterma de adsorción de Ni (II) utilizando biomasa seca del alga *Chlorella* sp. en soluciones acuosas sintéticas de concentración inicial 5,18 a 49,27 mg/L, a temperatura de 20°C, 2 horas de contacto y agitación constante de 110 r.min<sup>-1</sup>, (n=3).





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. Sin embargo, a medida que la superficie de la biomasa se va cubriendo con el metal, la adsorción se hace lenta, alcanzando una máxima capacidad de adsorción de 32,701 mg/g. Al comparar los resultados de remoción de Ni (II) obtenidos en este trabajo con otras investigaciones similares, no se encontró ninguna referencia con capacidades de bioadsorción superiores (OFER *et al.*, 2003). Teniendo en cuenta los valores de Qmax de la biomasa seca del alga *Chlorella* sp. se demuestra que el empleo de este tipo de biomasa bajo las condiciones de estudio contribuirá a la remoción Ni (II), lo que constituye una novedad práctica importante de este trabajo. La isoterma fue analizada bajo los modelos lineales de Langmuir y Freundlich y Los parámetros de estas se determinaron por regresión lineal, teniendo en cuenta el coeficiente de correlación lineal, el cual debe ser cercano a la unidad. Se sugiere que el modelo de Freundlich se ajusta mejor a los datos experimentales obtenidos, ya que el coeficiente de correlación fue de 0,9991, el cual es superior al modelo de Langmuir (0,9508). De la ecuación de la recta obtenida en el modelo de Freundlich se calcularon sus constantes de K y n, los cuales están relacionados con la afinidad del biosorbente por los

iones metálicos y la intensidad de la adsorción.

Los resultados para la bioadsorción de Ni (II) se resumen en la tabla 3.

**Tabla 3.** Resultados de bioadsorción de Ni (II)

Modelo de Freundlich		
K	n	R <sup>2</sup>
11,8	1,2	0,993

Estos valores determinaron una alta afinidad y una fuerza de adsorción intensa de la biomasa por el Ni (II), puesto que se obtuvo un valor de n más alto de 1. Estos resultados son similares a los presentados en algunos estudios los cuales emplean algas marinas como adsorbente (TUZUN *et al.*, 2005; OFER *et al.*, 2003). Estos resultados demuestran que bajo las condiciones de estudio la biomasa seca del alga *Chlorella* sp. podría ser empleada como un potencial biosorbente para la remoción de Ni (II) a partir de soluciones acuosas sintéticas.

## CONCLUSIONES

Los resultados de la remoción de Ni (II) haciendo uso de la biomasa seca del alga *Chlorella* sp. muestran que la capacidad máxima de adsorción fue de 32,701 mg/g; siendo superiores a los descritos en la literatura los cuales reportan valores Qmax en rangos de 0,05 -28 mg/g.

De los dos modelos estudiados para describir una isoterma de adsorción, el



de Freundlich se ajustó mejor a los datos experimentales, permitiendo calcular  $K=11,8$  y  $n=1,2$ , demostrándose, por tanto, una afinidad significativa del biosorbente por el Ni (II) ( $n>1$ ) así como una fuerza de adsorción intensa del metal por la biomasa.

El empleo de biomasa seca en los procesos de bioadsorción, presentan algunas ventajas adicionales si compara con el uso de células vivas, estas son: no es necesario adicionar nutrientes, resulta inmune a la toxicidad o a condiciones de operación adversas y la recuperación de los metales es más fácil por medio de tratamientos que permiten la reutilización de la biomasa. En este sentido, este método de biosorción es altamente recomendado, por lo que es importante plantear su estudio con otros elementos potencialmente tóxicos.

El análisis FTIR confirmó la interacción entre la superficie del sorbente y el ion Ni (II). Este reveló la existencia de grupos carboxilos, hidroxilos, carbonilos y aminos, los cuales son responsables de la bioadsorción de Ni (II).

### AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al grupo de investigación en Recursos Naturales de la Universidad de Pamplona por el acompañamiento a este trabajo, así como a todas las personas que directa o indirectamente contribuyeron a la realización del mismo.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANAYURT RA, SARI A & TUZEN M (2009) Equilibrium, thermodynamic and kinetic studies on biosorption of Pb(II) and Cd(II) from aqueous solution by macrofungus (*Lactarius scrobiculatus*) biomass. *Chem Eng J* **151**: 1-3: 255-261

BARAN L, BICAK E, BAYSAL S, ONAL S (2006) Comparative studies on the adsorption of Cr (IV) ions on to various sorbents. *Biores Technol* **98**(3):661-665.

BARSANTI L & GUALTARI P (2006) *Algae: Anatomy, Biochemistry and Biotechnology*. CRC PressINC, 301

BUASRI A, CHAIYUT N, TAPANG K, JAROENSIN S & PANPHROM S (2012) Equilibrium and Kinetic Studies of Biosorption of Zn(II) Ions from Wastewater Using Modified Corn Cob. *Asia-Pacific Chemical, Biological & Environmental Engineering Society Procedia* **3**: 60 – 64

CAÑIZARES-VILLANUEVA RO (2000) Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamérica de Microbiología* **42**: 131-143

CHICÓN L (2006) Especiación de metales pesados en lodos de aguas residuales de origen urbano y aplicación de lodos digeridos como mejoradores de suelos. Universidad de Málaga, España

DAVIS TA, VOLESKY B & MUCCI A (2003) Biochemical analysis of the bioadsorción of heavy metals for brown algae. *Water Research* **37**: 4311-4330

DE PHILIPPIS R, COLICA G & MICHELETTI E (2011) Exopolysaccharide-producing cyanobacteria in heavy metal removal from



water: molecular basis and practical applicability of the biosorption process. *Appl Microbiol Biotechnol* **92**: 4: 697–708

DEMAIN A, SOLOMON N (1986) Manual of industrial microbiology and technology. A. S. M., Washington DC.

GOKSUNGUR Y, UREN S & GUVENC U (2005) Biosorption of cadmium and lead ions by ethanol treated waste baker's yeast biomass. *Bioresour Technol* **96**: 1: 103-109.

GRAHAM LE & WILCOX LE (2000) Algae. Prentice Hall International. London, 420

GUPTA VK & RASTOGI A (2009) Biosorption of hexavalent chromium by raw and acid-treated green alga *Oedogonium hatei* from aqueous solutions. *J Hazard Mater* **163**: 1: 396-402.

IYER A, MODY K & JHA B (2005) Biosorption of heavy metals by a marine bacterium. *Mar Pollut Bull* **50**: 3: 340-343.

KUMARJI & OOMMEN C (2012) Removal of heavy metals by biosorption using freshwater alga *Spirogyra hialina*. *J Environ Biol* **33**: 1: 27-31.

MAYUR M, RAHUL S, B.K. KONWAR & KATAKI R (2011) Microalgae *Chlorella* as potencial bio-energy feedstock. *Appl Energy* **88**: 3307-3312.

NAGPAL MK, BANKAR A, PAWAR N, KAPADNIS B & ZINJARDE S (2011) Equilibrium and Kinetic Studies on Biosorption of Heavy Metals by Leaf Powder of Paper Mulberry (*Broussonetia papyrifera*). *Water Air Soil Pollut* **215**: 1-4: 177–188

NILANJANA DAS, VIMALA R & KARTHIKA P

(2008) Biosorption of heavy metal-An overview. *Indian Journal of Biotechnology* **7**: 159-169

OFER R, YERACHMIEL A, SHMUEL Y (2003) Marine macroalgae as biosorbents for cadmium and nickel in water. *water research*. **37**: 3: 627-633.

PAPINI MP, SAURINI T, BIANCHI A, MAJONE M & BECCARI M (2004) Modeling the Competitive Adsorption of Pb, Cu, Cd, and Ni onto a Natural Heterogeneous Sorbent Material (Italian "Red Soil"). *Ind eng chem res* **43**: 5032-5041

SARI A & TUZEN M (2008) Biosorption Pb(II) and cd(II) from aqueous solution using green alga (*Ulva lactuca*) biomass. *J Hazard Mater* **152**: 1: 302-308

SOLTMANN ULRICH, MATYS SABINE, KIESZIG GUNTER, POMPE WOLFGANG & BÖTTCHER HORST (2010) Algae-Silica Hybrid Materials for Biosorption of Heavy Metals. *Journal Water Resource and Protection* **2**: 2: 115-122

SUH JH, YUN JW & KIM DS (1998) Comparison of Pb<sup>2+</sup> accumulation characteristics between live and dead cells of *Saccharomyces cerevisiae* and *Aureobasidium pullulans*. *Biotechnol Lett* **20**: 3: 247-251

TAMER A, ZEMIN K, SEFIKA U, DILEK Y, GULDEM O, SIBLE T (2009) Enhanced biosorption of nickel (II) ions by silica-gel immobilized waste biomass: Biosorption characteristics in batch and dynamic flow mode. *J Hazard Mater* **163**: 1134-1143.

TUNALI S, AKAR T, OZCAN AS, KIRAN I & OZCAN A (2006) Equilibrium and kinetics of biosorption of lead (II) from aqueous solutions



by *cephalosporium aphidicola*. *Sep Purif Technol* 47: 3: 105-112.

TURKER AR (2012) Separation, preconcentration and speciation of metal ions by solid phase extraction. *SepPurif Rev* 41: 169-206.

TUZUN I, BAYRAMOGLU G, YALCIN E, BASARN G, CLEIK G, ARICA M (2005) Equilibrium and kinetic studies on biosorption of Hg (II), Cd (II) y Pb (II) ions onto microalga *Chlamydomonas reinhardtii*. *Journal environmental management* 77: 2: 85-92

WANG JL & CHEN C (2009) Biosorbents for heavy metals removal and their future. *Biotechnol Adv* 27: 2: 195-226

WITEK-KROWIAK A, SZAFRAN RG, MODELSKI S (2011) Biosorption of heavy metals from aqueous solutions onto peanut shell as a low-cost biosorbente. *Desalination* 265: 1-3: 126-134

\*Cada valor corresponde a la media  $\pm$  la desviación estándar en ensayos por triplicado bajo las mismas condiciones

C inicial (mg/L)	Ce media (mg/L)	Qe media (mg/g)*
5,18	3,34 $\pm$ 0,0109	3,67
9,92	6,42 $\pm$ 0,0730	7,00
20,87	13,57 $\pm$ 0,0730	14,59
30,29	19,78 $\pm$ 0,2190	21,02
40,58	26,86 $\pm$ 0,2920	27,44
49,27	32,92 $\pm$ 0,5109	32,70

**Tabla 2.** Datos de los ensayos de adsorción de Ni (II) de la biomasa seca del alga *Chlorella* sp.

