






Hydrochloric acid concentration and time to maximize lead and cadmium removal in laboratory wastewater

Elmis García Zare, Doctor¹, Patricia Isabel Mejía Pardo, Magister², Segundo Eloy Soto Abanto, Doctor³, Noelia Patricia Rodríguez Paredes, Magister⁴ and Marco Antonio Cerna Vásquez, Magister⁵






¹Universidad Cesar Vallejo, Perú, ejgarciaz@ucvvirtual.edu.pe, pamejiap@ucvvirtual.edu.pe, ssotoa@ucv.edu.pe, nrodriguezpa95@ucvvirtual.edu.pe, mcernav@ucvvirtual.edu.pe

Abstract - The bioadsorption treatment was performed on the wastewater from a university chemical analysis laboratory using *Chondracanthus chamissoi* algae, commonly known as "mococho," as the biomass. The study factors included the concentration of hydrochloric acid ranging from 1 to 2 N and contact times ranging from 2 to 7 hours in a continuous flow bioreactor. The objective was to determine the combination of factors that maximizes the removal of Lead (Pb) and Cadmium (Cd). A 2k factorial design with central points and the response surface method were used. From the results, it was found that the combination of factors, hydrochloric acid concentration (HCl), and contact time that maximizes the removal of Pb ions is 2.5 N and 6.8 hours, while the combination of factors that maximizes the removal of Cd ions is 2.1 N and 22 hours. It was determined that the study factors generate statistically significant differences in the removal of Pb compared to Cd.

Keywords-- bioadsorption, heavy metal, wastewater, environmental degradation

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Concentración de ácido clorhídrico y tiempo para maximizar la remoción de plomo y cadmio en aguas residuales de laboratorios

Elmis García Zare, Doctor¹, Patricia Isabel Mejía Pardo, Magister¹, Segundo Eloy Soto Abanto, Doctor¹, Noelia Patricia Rodríguez Paredes, Magister¹ and Marco Antonio Cerna Vásquez, Magister¹

¹Universidad Cesar Vallejo, Perú, ejgarciaz@ucvvirtual.edu.pe, pamejiap@ucvvirtual.edu.pe, ssotoa@ucv.edu.pe, nrodriguezpa95@ucvvirtual.edu.pe, mcernav@ucvvirtual.edu.pe

Resumen– Se realizó el tratamiento de bioadsorción a las aguas residuales de un laboratorio de análisis químico universitario utilizando como biomasa a las algas *Chondracanthus chamissoi* “mococho”, bajo factores de estudio: concentración de ácido clorhídrico entre 1 y 2 N y tiempos de contacto entre 2 y 7 h en un biorreactor a flujo continuo, con el fin de determinar la combinación de los factores que maximicen la remoción de Plomo (Pb) y Cadmio (Cd). Se usó un diseño factorial 2k con puntos centrales y el método de superficie respuesta; de los resultados se encontró que la combinación de los factores concentración de ácido clorhídrico (HCl) y tiempo de contacto que maximiza la remoción de iones de Pb son 2.5N y 6.8h y la combinación de los factores que maximiza la remoción de iones de Cd son 2.1N y 22h, determinando que los factores de estudio generan diferencias estadísticamente significativas en la remoción de Pb que de Cd.

Palabras clave-- bioadsorción, metal pesado, agua residual, deterioro ambiental

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación es uno de los fenómenos de degradación del ambiente que se ha convertido en una situación común en países de todas las latitudes, con diversos niveles de desarrollo y culturas. El sector industrial, al emplear sustancias tóxicas en su proceso de manufactura, se ha convertido en uno de los agentes que propician el aumento de la contaminación [1].

Sin embargo, el sector educación es igualmente responsable del incremento de la contaminación, ya que en la mayoría de los laboratorios de análisis químico universitarios también se manejan una cantidad de productos químicos y se efectúan diversas prácticas que conllevan a la generación de residuos que, en la mayoría de los casos, son peligrosos para la salud y el ambiente, como el caso de los metales pesados, que por su naturaleza suelen acumularse en el ambiente, constituyéndose altamente peligrosos por el riesgo de toxicidad hacia los seres vivos [2,3].

En los laboratorios de análisis químico universitarios se realizan prácticas experimentales con fines académicos propios de la formación profesional, sin embargo, la gran mayoría de estos ambientes carecen de procesos, protocolos y/o sistemas adecuados para la manipulación y tratamiento

responsable de los residuos químicos, siendo una práctica común, el desechar estos residuos por los conductos o tuberías de agua, generando de esta forma las aguas residuales con metales pesados. Esto conlleva a una contaminación continua e inadvertida de metales pesados por parte del sector educación que suma al impacto de contaminación que ya generan otros sectores (industrial, minero, etc.).

Entre los principales problemas de algunos metales pesados está la tendencia a bioacumularse y a biomagnificarse. Con la finalidad de profundizar sobre esto se revisó repositorios y bases de datos especializados, encontramos un estudio que analizó los niveles de concentración de Cu, Zn, Cd y Pb en cangrejos de río americano (*Procambarus clarkii*) capturados en los humedales afectados por el derrame de residuos tóxicos procedentes de las minas de Aznalcóllar (Sevilla, España); llegando a la conclusión que los niveles de metales superan los permitidos por la legislación española para crustáceos, especialmente en la zona más próxima al derrame [4].

En otro estudio se realizó la cuantificación de arsénico, cadmio y plomo en las aguas de un tramo del río Santa en el tramo adyacente al Pasivo Ambiental Minero de Recuay, Ticapampa, en la provincia de Recuay el cual forma parte del departamento de Ancash (Perú). La concentración de arsénico fue 0.0404 mg/L, del plomo 0.6402 mg/L y del cadmio 0.0396 mg/L; siendo todos ellos superiores a los límites máximos permisibles establecidos por los “Estándares Nacionales de Calidad Ambiental de Agua” del Ministerio del Ambiente. Según los resultados obtenidos. El estudio comprueba que parte de la contaminación del río Santa es provocada principalmente por la descarga de residuos mineros que están ubicados a lo largo de todo su cauce (en el tramo de Ticapampa – Recuay), ya que usan el río Santa como vía de eliminación de sus residuos [5].

Existen numerosos métodos físicos, químicos y biológicos para el tratamiento y la remoción de metales pesados presentes en soluciones acuosas. Entre las tecnologías biológicas, se destaca la bioadsorción [6] que puede ser definida como una tecnología de remoción de metales y metaloides de efluentes por materiales biológicos. Grandes cantidades de metales pueden acumularse en los materiales biológicos a través de una amplia variedad de procesos dependientes o independientes del metabolismo [7]. El

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

proceso es de simple operación y es muy similar a la adsorción convencional o las columnas de intercambio iónico. Es altamente efectivo en el tratamiento de efluentes diluidos [8]. La única diferencia es que el material empleado es biológico, metabólicamente inactivo, selectivo y regenerable [9].

Por ejemplo, en la referencia [10] examinaron la capacidad de *Corallina officinalis* L. (pretratada con una solución de 1.4M de HCl por 3h), *Porphyra columbina* y *Codium fragile*, de la costa atlántica del sur argentino para remover metales pesados de aguas contaminadas, a partir de ensayos de bioadsorción utilizando soluciones diluidas de cadmio; determinando el efecto de las dosis de muestra empleadas en la bioadsorción de cadmio, en condiciones pre-establecidas de equilibrio. *C. officinalis* y *P. columbina* presentaron una alta efectividad (>90%), superior a la determinada para *C. fragile* y para un carbón activado comercial empleado con fines comparativos, para dosis mayores a 0.3 g/100 mL. *P. columbina* presenta mayor potencial para la bioadsorción de cadmio de aguas contaminadas, que *C. officinalis* y *C. fragile*. Además, a partir de ensayos de bioadsorción de níquel, se encontró que todas las algas son relativamente menos efectivas para capturar esta especie metálica y que *C. officinalis* presenta el mejor desempeño.

En otra investigación [11] se estudió la bioadsorción del ión cadmio mediante el alga *Ascophyllum nodosum*, variando el tamaño de partículas del alga y el pH de la solución. Indicando que la optimización del proceso se obtuvo a pH=5.6 y tamaño de partícula <75µm en un tiempo aproximadamente de 40 minutos. Por otro lado, en la referencia [12] se estudió la influencia de la concentración ácida y el tiempo de contacto para la reducción de cromo usando *Ulva lactuca*; determinando la concentración ácida óptima en 0.19N y el tiempo de contacto 14.8h. A su vez en la referencia [13], se evaluó la adsorción de cobre, hierro y mercurio en solución con concentraciones de 100, 300 y 500ppm del alga *Chondracanthus chamissoi* “cochayuyo” durante tiempos de contacto de 2, 4 y 6 horas; para el tiempo de contacto de 6 h se obtuvo un peso promedio adsorbido de Cu, Fe y Hg de 78.4, 85.6 y 70.8 µg/g de alga, respectivamente; y para un tiempo de 2 h se obtuvo un peso promedio adsorbido de Cu, Fe y Hg de 43.8, 38.8 y 32.6, respectivamente, concluyendo que la variable más significativa fue el tiempo de contacto.

Otro estudio evaluó la influencia de la concentración ácida y el tiempo de adsorción en la reducción del cromo hexavalente en efluentes líquidos de curtiembre, utilizando el alga *Chondracanthus chamissoi*. Determinó una influencia directa de la concentración y el tiempo, además, la reducción máxima del metal con las variables de mayor nivel 0.2N y 7h [14].

Estas referencias permiten plantear alternativas de remoción de metales pesados en aguas residuales a través de insumos y procedimientos viables. El alga *Chondracanthus chamissoi*, es una buena alternativa de material biológico, ya que está presente en nuestro litoral peruano y es económicamente accesible. Además, es necesario establecer

una solución ácida con una concentración adecuada para el proceso de remoción. Por este motivo, se propuso como objetivo principal de investigación determinar una concentración de ácido clorhídrico (HCl) que permita una máxima remoción de plomo (Pb) y cadmio (Cd) en el menor tiempo posible de procesamiento usando el alga *Chondracanthus chamissoi*, como biofiltro. Esta investigación permitirá establecer parámetros a nivel experimental y elaborar un prototipo de biorreactor como sistema de remoción de metales pesados en aguas residuales con miras a ser mejorado y estandarizado para su implementación en los laboratorios químicos nivel universitario, con miras a reducir el impacto ambiental.

II. MARCO TEÓRICO

A. Metal pesado

El término de metal pesado refiere a cualquier elemento químico metálico con pesos atómicos superiores a 44.956 y una densidad mayor a 5g/cm³; excluyendo a los grupos Alcalino y Alcalino Térreos. Algunos son esenciales para el desarrollo de las funciones vitales de los organismos, como cobalto, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, vanadio y estroncio, pero en cantidades excesivas son perjudiciales e incluso letales para los seres vivos. Los ejemplos de metales pesados implicados en problemas de contaminación son cadmio (Cd), arsénico (As), cromo (Cr), talio (Tl), y plomo (Pb) [15].

B. Plomo

El plomo (Pb, número atómico 82, masa atómica 207) es un metal con mucha utilidad en la actividad industrial, puesto que sirve para la elaboración de diferentes productos: tuberías, envolturas de cables, etc. Debido a su uso cotidiano fue evidente la reacción que producía en la naturaleza y en el hombre. El plomo puede estar presente en alimentos, agua que consumimos y en el aire; se acumula poco a poco en los organismos, daña el sistema nervioso y deteriora la síntesis de los glóbulos rojos de la sangre [16].

C. Cadmio

El cadmio (Cd, número atómico 48, masa atómica 111.40) se obtiene como subproducto del tratamiento metalúrgico del zinc y del plomo, a partir de sulfuro de cadmio; en el proceso hay formación de óxido de cadmio, compuesto muy tóxico. Además de contaminar el ambiente desde su fundición y refinación, contamina también por sus aplicaciones: pigmento en pinturas, esmaltes, plásticos, textiles, aleación con cobre, aluminio y plata, producción de pilas de cadmio-níquel, etcétera; usos tan diversos y su larga vida media no permiten el reciclaje, por lo que se acumula progresivamente en el medio ambiente [17]. Este metal incorpora en todos los niveles de la cadena alimenticia, desde los microorganismos hasta el humano, el consumo de vegetales de hojas, pescados, mariscos, algas y agua es el método usual de entrada de cadmio al cuerpo humano [16]. En

lo ambiental, la concentración de cadmio en el aire de áreas industriales varía de 9.1 a 26.7µg/m³ frente a 0.1 a 6µg/m³ en el aire de áreas rurales. En el suelo este metal llega a los terrenos agrícolas por deposición aérea (41%), con los fertilizantes fosfatados (54%), por aplicación de abono de estiércol (5%) y, en el Perú, frecuentemente por efluentes que contienen residuos líquidos y sólidos de plantas hidrometalúrgicas de cadmio. Se ha encontrado que, en suelos contaminados, los niveles de cadmio alcanzan valores de hasta 1mg de Cd/L y el agua de ríos contaminados puede contener hasta 0.14mg de Cd/L. [18,19].

D. Estándares de calidad de agua

Mediante Decreto Supremo N° 015-2015-MINAM, publicado el 19 de diciembre de 2015, en el diario oficial El Peruano, el Ministerio del Ambiente (MINAM), en coordinación con todos los sectores gubernamentales, en un proceso iniciado el año 2012 y luego de la pre publicación del proyecto y de la consulta pública respectiva, aprobó los Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA de Agua).

Los ECA para agua están orientados a proteger el ambiente y la salud y establecen objetivos de calidad que deben ser cumplidos por los diversos titulares de actividades económicas de diversos sectores, y contienen parámetros para determinar el uso que puede darse a un cuerpo de agua. En el Perú, desde la Ley de Aguas (Decreto Ley N° 17752 de 1969) y luego con la Ley de Recursos Hídricos (Ley N° 29338 del año 2009); se señala que los ECA de Agua deben fijarse en función a las categorías determinadas en relación al uso que se le va a dar al cuerpo natural de agua como se detalla a continuación:

TABLA I

ECA PARA CALIDAD DEL AGUA SEGÚN CATEGORÍA Y USO.

Metal	Unidad de medida	A1 (Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección)	A2 (Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional)	A3 (Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado)
Plomo (Pb)	mg/L	0.01	0.05	0.05
Cadmio (Cd)	mg/L	0.003	0.005	0.01

E. Biosorción

El término biosorción se utiliza en relación a la captación de metales por los grupos funcionales que actúan como sitios activos, entre ellos están: los carboxilatos (-COO-), las amidas (NH₂), los fosfatos (PO₄⁻, PO₃⁻), los tioles (-SH) y los hidróxidos (-OH) presentes en la pared celular de la biomasa o biosorbente, a través de mecanismos fisicoquímicos tales como: adsorción y principalmente el intercambio iónico [20,21].

F. Adsorción

La adsorción es la acumulación de moléculas de soluto en la superficie de un sólido. Se distingue entre adsorción física o fisiorción, en la que la especie adsorbida mantiene su forma química original y en la que intervienen atracciones de tipo electrostático y fuerzas de Van Der Waals; y la adsorción de tipo químico o quimisorción, en la que la especie adsorbida cambia de forma química como consecuencia de su interacción con el sólido. En general, en la adsorción física, la velocidad del proceso global está controlada por las etapas de transferencia de materia, ya que la retención es casi instantánea porque únicamente depende de la frecuencia de colisión y de la orientación de las moléculas. En cambio, si la adsorción es de tipo químico, lo cual implica la formación de enlaces, la etapa de la reacción química puede ser lenta y llegar a controlar el proceso [22].

G. El alga *Chondracanthus chamissoi*

Las algas son plantas primitivas no vasculares que no poseen un sistema radicular y las sustancias nutritivas son absorbidas por los rizoides, que se encargan de fijar el alga al sustrato. Las algas son organismos que poseen una gran cantidad de agua, entre un 55 a 90%, repartido entre el tallo, filoides y rizoides. Las algas pueden ser un medio muy útil para conocer la concentración de metales en el medio ambiente marino. Sería lógico esperar cantidades parecidas en el agua y en las algas ya que se trata de plantas no vasculares por lo que, si aparecen corrientes de agua con una cantidad de cobre, cadmio y zinc 43, 35 y 20 veces superior a los valores normales, cabe inferir que las algas tengan estas mismas cantidades [23].

El alga *Chondracanthus chamissoi* “mococho” pertenece al *Phylum Rhodophyta*, Clase *Florideophyceae*, Orden *Gigartinales*, Familia *Gigartineaceae*, Género *Chondracanthus*, Especie *chamissoi*. Es una especie endémica de la costa templada del Pacífico Sur, que se distribuye desde Paita, Perú (5° 04' S, 81° 05' W), hasta Chiloé, Chile (42° 40' S, 73° 55' W), y habita en las zonas rocosas del intermareal y submareal [24].

La composición de la pared celular del alga roja (*Rhodophyta*) tiene componente fibrilar de celulosa y los principales componentes de la matriz amorfa son los polisacáridos sulfonados como fucoides, galactasas (agar, carragenanos, etc.) constituyendo hasta el 70% del peso seco de su pared celular. Las proteínas representan un 35 – 50% de la pared celular. Las variaciones morfológicas pueden favorecer a la asimilación de los contaminantes de metales pesados a partir del material particulado en suspensión [25].

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Muestras de aguas residuales

Se recolectó un total de 2 litros de aguas residuales distribuidos en 13 muestras (unidades experimentales) para evaluarlos con un diseño factorial 2k con puntos centrales. Los

parámetros iniciales previos a la aplicación del diseño experimental son las siguientes:

TABLA II
PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS INICIALES DE LAS MUESTRAS DE AGUA RESIDUAL

Metal	Concentración (ppm)
Plomo (Pb)	104.54
Cadmio (Cd)	1.3
pH	4.5

B. Preparación de biofiltro de algas

Se seleccionó y lavó algas con abundante agua potable, con la finalidad de eliminar cualquier impureza tales como arena, restos de biomasa; finalmente se lavó con agua destilada. Posteriormente, se sumergió en agua hirviendo por un tiempo de 10 minutos, con la finalidad de eliminar la baba o agar. Porciones de algas de 750g se sumergieron en soluciones de ácido clorhídrico de 1N, 1.5N (punto central) y 2N respectivamente, durante 40 minutos. Mediante compactación manual se formaron pequeñas esferas (pellets) que luego fueron secadas en una estufa a 40°C por 48 horas, obteniéndose así, el biofiltro de 5g por pellets listo para ser usado en un biorreactor.

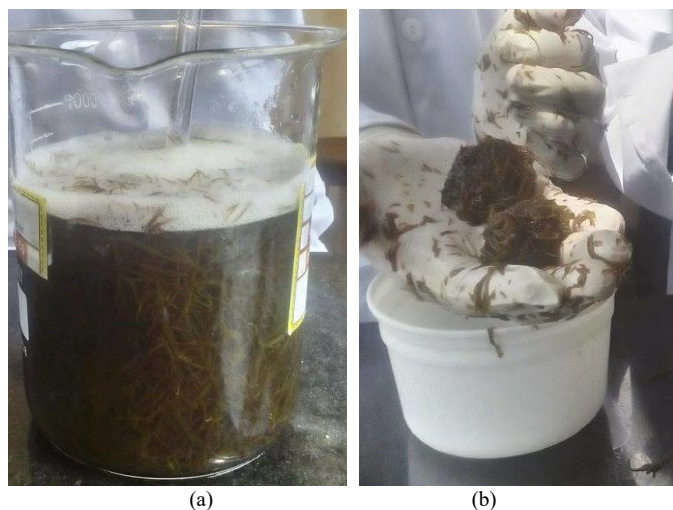


Fig. 1 Preparación: (a) sumersión a solución de HCl. (b) Compactación manual de pellets

C. Proceso de remoción

Proceso en el que se somete a contacto el biofiltro con el agua residual a través de un sistema de recirculación continua durante un tiempo experimental establecido entre 2 y 7 horas 5 pellets (25gr).

II. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

A. Estadísticas descriptivas

A continuación, se muestra cómo cada factor experimental (ácido clorhídrico y tiempo), en sus diferentes niveles, ha impactado en la disminución de concentración promedio de metales pesados.

TABLA III
CONCENTRACIÓN PROMEDIO Y PORCENTAJE DE REMOCIÓN DEBIDO A LA APLICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

Factor experimental	Metal pesado			
	Pb		Cd	
	Media	% remoción	Media	% remoción
HCl				
1N	45.575	56.4	1.15	11.5
2N	26.75	74.4	1.098	15.5
Tiempo				
2 horas	42.075	59.8	1.275	19.0
7 horas	30.25	71.1	0.973	25.2

En la tabla III, se observa que a diferentes concentraciones de HCl se aprecia remoción de Plomo (Pb), teniendo en cuenta que su concentración inicial fue de 104.54ppm (tabla II) y posteriormente fue de 45.575ppm (ante el tratamiento de 1N) y 26.75ppm (ante el tratamiento de 2N), los porcentajes de remoción son importantes (tabla III). Este mismo efecto se puede apreciar también cuando se evalúa en diferentes tiempos. Por otro lado, se observa que a diferentes concentraciones de HCl existe una mínima remoción de cadmio, dado que su concentración inicial fue de 1.3ppm, y luego se reduce a tan solo 1.15ppm (ante el tratamiento de 1N) y 1.098ppm (ante el tratamiento de 2N). No obstante, a diferentes tiempos de contacto sí se observan porcentajes de remoción un poco mayores.

B. Análisis por el método de superficie de respuesta.

TABLA IV
ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS FACTORES EXPERIMENTALES TIEMPO Y ÁCIDO CLORHÍDRICO EN ADSORCIÓN DE PLOMO Y CADMIO

Factor	Metal pesado			
	Plomo		Cadmio	
	F	p-valor	F	p-valor
A: Ácido clorhídrico	5147.66	0.000	2.940	0.125
B:Tiempo	2660.22	0.000	97.680	0.000
AB	49.84	0.000	1.130	0.319
Curvatura	0.37	0.558	0.760	0.410

TABLA V
COEFICIENTES DEL MODELO LINEAL ESTIMADO PARA EL
DISEÑO FACTORIAL 2K EN REMOCIÓN DE PLOMO.

Factores	Efecto	Coefficientes	D.E.	t-student	p-valor
Constante		33.13	0.1735	190.89	0.000
A: Ácido clorhídrico	-24.9	-12.45	0.1735	-71.75	0.000
B: Tiempo	-17.9	-8.95	0.1735	-51.58	0.000
AB		1.22	0.1735	7.06	0.000
Puntos centrales		-0.17	0.2798	-0.61	0.558

D.E.: Desviación estándar de los coeficientes. R2(ajustado) = 99.85%

$$\text{Modelo 1er. orden: } Y=33.13-12.45X_A-8.95X_B \quad (1)$$

TABLA VI
COEFICIENTES DEL MODELO LINEAL ESTIMADO PARA EL
DISEÑO FACTORIAL 2K EN REMOCIÓN DE CADMIO

Factores	Efecto	Coefficientes	D.E.	t-student	p-valor
Constante		1.1238	0.0153	73.43	0.000
A: Ácido clorhídrico	-0.0525	-0.0263	0.0153	-1.72	0.125
B: Tiempo	-0.3025	-0.1512	0.0153	-9.88	0.000
AB	-0.0325	-0.0163	0.0153	-1.06	0.319
Puntos centrales		0.0215	0.02468	0.87	0.410

DE: Desviación estándar de los coeficientes. R2(ajustado) = 89.14%

$$\text{Modelo 1er. orden: } Y=1.1238-0.0263X_A-0.1512X_B \quad (2)$$

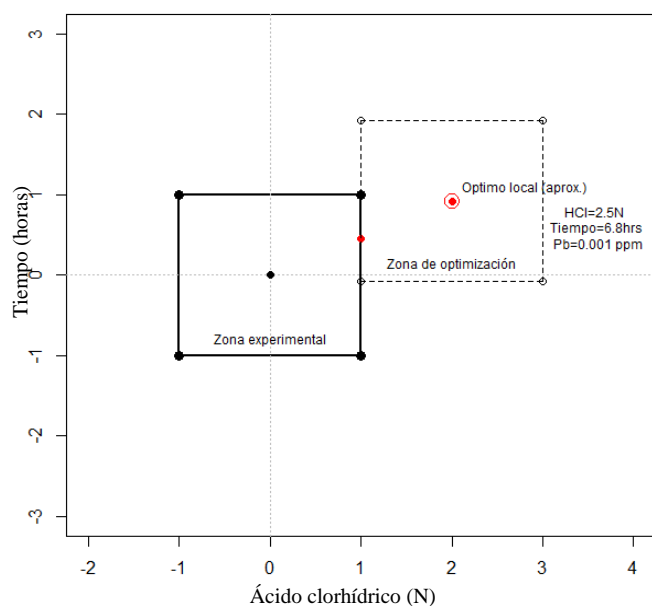


Fig. 2 Ubicación de la zona de optimización para remoción de plomo.

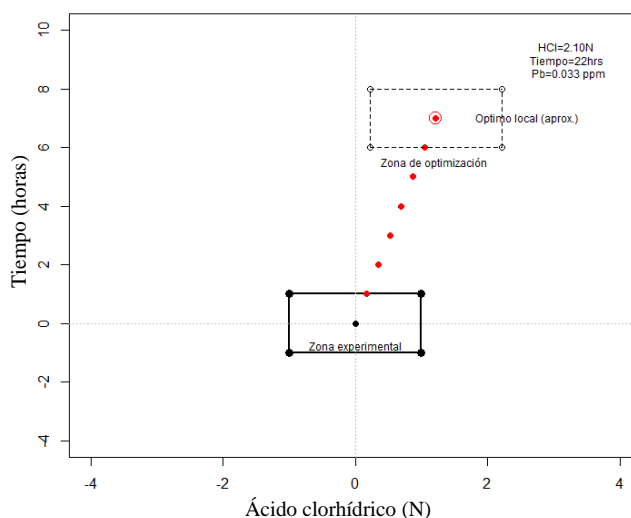


Fig. 3 Ubicación de la zona de optimización para remoción de cadmio.

Se realizó un estudio estadístico descriptivo con el fin de evaluar de forma preliminar los efectos de cada factor estudiado (ácido clorhídrico y tiempo de contacto). El cuadro I, muestra que a diferentes concentraciones de HCl sí se aprecia remoción de Pb, teniendo en cuenta que su concentración inicial fue de 104.54 ppm (Tabla III). Este efecto se puede apreciar también cuando se evalúa en diferentes tiempos.

Respecto a la remoción de Cd, se observa que, a diferentes concentraciones de HCl, parece no haber mucha diferencia con la concentración inicial (1.3 N). No obstante, a diferentes tiempos de contacto sí se observan diferencias importantes en su remoción.

Basado en el panorama que nos ofrece el estudio estadístico descriptivo, se realizó el estudio analítico mediante un diseño factorial 2k con puntos centrales y el método de superficie respuesta. En la tabla IV se muestran los resultados del Análisis de Varianza (ANOVA) para el diseño propuesto. Se observa que ambos factores (HCl y tiempo de contacto, de forma independiente e interactiva) generan diferencias estadísticamente significativas ($p\text{-valor}=0.000$) en la remoción de Pb, esto quiere decir que pudo haber una mayor remoción de depósitos de carbonato de calcio presentes en la estructura de la pared celular del alga, aumentando el número de sitios activos [10]. En tanto que para el Cd se observa que los niveles de HCl no generan diferencias estadísticamente significativas ($p\text{-valor} = 0.125$), pero el tiempo de contacto si es significativo ($p\text{-valor} = 0.000$), deduciéndose que la interacción entre estos factores tampoco es significativa ($p\text{-valor} = 0.319$).

De lo anterior se deduce que la afinidad del alga *Chondracanthus chamissoi* por los iones de Pb es muy notoria en comparación con los iones de Cd, [26] indica que, en el tratamiento de biosorción utilizando *Sargassum vulgare* absorbe el doble de Pb que de Cd; asimismo, [27] determinó que un gramo de alga *Padina sp.*, elimina 53mg de Zn y 84mg de Cd, los cuales equivalen a la quinta y tercera parte de lo

que elimina de plomo, respectivamente; este comportamiento lo sustenta [28] en base al concepto de acidez de Lewis, definida como la relación masa/carga de un catión determinado; es decir, si tenemos cationes isovalentes, el ion de mayor peso atómico será mejor y más eficientemente adsorbido que los demás, debido a que su acidez y la interacción con el adsorbente es muy significativa.

Dado que ninguno de los niveles de cada factor en la zona experimental no genera una máxima remoción de Pb y Cd, se realizó una proyección con el método de superficie de respuesta para determinar una zona experimental óptima.

La Tabla V muestra el análisis de los puntos centrales, siendo éstos estadísticamente no significativos, lo que implica que no existe curvatura en la zona experimental, es decir, que en los niveles experimentales estudiados no es posible encontrar la máxima remoción de Pb, por tanto, se calculó el modelo de primer orden (1) a partir del diseño factorial 2k donde las significancias de sus coeficientes (p -valor = 0.000), estimándose con dicha ecuación las variaciones que determinan la dirección hacia la zona óptima que maximiza la remoción de Pb (Fig. 2).

Asimismo, en el cuadro VI se muestra el análisis de los puntos centrales, siendo éstos estadísticamente no significativos, por lo que tampoco existe curvatura en la zona experimental, entonces tampoco es posible encontrar la máxima remoción de Cd en esta zona. Se calculó el modelo de primer orden (2) a partir del diseño factorial 2k, encontrándose significancia solo para el factor tiempo con un p -valor=0.000, estimándose así las variaciones que determinan la dirección hacia la zona óptima que maximiza la remoción de Cd (Fig. 3).

CONCLUSIONES

El uso del alga *Chondracanthus chamissoi* muestra una buena capacidad de remoción de metales pesados cuando se procesa con una solución de HCl, por lo tanto, la formación de biofiltros (pellets) con este material biológico es viable.

La capacidad de remoción del biofiltro se ve influenciada por la concentración de HCl a la que fue sometida durante el proceso de preparación. Por otro lado, dicha capacidad también varía según el tiempo de contacto con el agua residual durante el proceso de remoción.

La combinación de los factores concentración de ácido clorhídrico (HCl) y tiempo de contacto que maximiza la remoción de iones de Pb son: 2.5N y 6.8h.

La combinación de los factores concentración de ácido clorhídrico (HCl) y tiempo de contacto que maximiza la remoción de iones de Cd son: 2.11N y 22h.

Al nivel de 1N de HCl la concentración final de Pb fue de 45.575ppm (56.4% de remoción). Al nivel de 2N de HCl la concentración final de Pb fue de 26.75ppm (74.4% de remoción).

A un tiempo de contacto de 2h, la concentración final de Pb fue de 42.075ppm (59.8% de remoción). A un tiempo de

contacto de 7h, la concentración final de Pb fue de 30.25ppm (71.1% de remoción).

Al nivel de 1N de HCl la concentración final de Cd fue de 1.15ppm (11.5% de remoción). Al nivel de 2N de HCl la concentración final de Cd fue de 1.098ppm (15.5% de remoción).

A un tiempo de contacto de 2h, la concentración final de Cd fue de 1.275ppm (1.9% de remoción). A un tiempo de contacto de 7h, la concentración final de Cd fue de 0.973ppm (25.2% de remoción).

De lo anterior se deduce que el biofiltro actúa de forma más adecuada para remover el Pb, dado que necesita menor tiempo de proceso, siendo el tiempo una característica importante para un tratamiento de aguas residuales a mayor escala.

Es necesario hacer un estudio sobre el volumen de agua residual que aproximadamente desechan los laboratorios de análisis químicos universitarios a fin de diseñar un prototipo de sistema de recirculación para remoción de metales pesados.

Se debe evaluar el reaprovechamiento de HCl que se usa en el proceso de preparación de biofiltros por *Chondracanthus chamissoi* a fin de que tampoco sea un elemento contaminante adicional a los que pretende tratar.

Es posible que otras algas tengan mejor eficiencia de remoción, es decir, que necesite menor concentración de HCl y en menor tiempo para una mayor capacidad de remoción.

REFERENCES

- [1] N. Benitez. (2015). "Producción limpia y biorremediación para disminución de la contaminación por cromo en la industria de curtiembres". *Ambiente y Sostenibilidad* (1), 25-31
- [2] R. Osicka, M. Benitez, & M. Giménez. (2004). Gestión y manejo de residuos químicos en el laboratorio: una manera de prevenir la contaminación del medio ambiente.
- [3] R. Saquicela (2014). Elaboración de un diseño de un sistema de gestión ambiental para afluentes líquidos en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Cuenca.
- [4] F. López (2003). Determination of heavy metals in crayfish by ICP-MS with a microwave-assisted digestion treatment. *Ecotoxicology and environmental safety*, 54(2), 223-228.
- [5] E. Graza & R. Quispe (2015). Determinación de Pb, Cd, As en aguas del río Santa en El Pasivo Minero Ambiental de Recuay, Ticapampa; Recuay-Ancash.
- [6] B. Volesky (2001). "Detoxification of metal-bearing effluents: biosorption for the next century". *Hydrometallurgy*, 59(2), 203-216.Ss
- [7] F. Veglio & F. Beolchini (1997). "Removal of metals by biosorption: a review". *Hydrometallurgy*, 44(3), 301-316.
- [8] Y. Orhan (2006). "Biosorption of heavy metals from wastewater by biosolids". *Engineering in Life Sciences*, 6(4), 399-402.
- [9] G. Gadd, (2009). "Biosorption: critical review of scientific rationale, environmental importance and significance for pollution treatment". *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 84(1), 13-28.
- [10] M. Basso et. al (2002). "Lignocellulosic materials as potential biosorbents of trace toxic metals from wastewater". *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41(15), 3580-3585.
- [11] A. Navarro et al (2004). "Biorremoción de cadmio (II) por desechos de algas marinas: optimización del equilibrio y propuesta de mecanismo". *Revista-Sociedad Química del Perú*, 70(3), 147.
- [12] J. J. Rebollo (2012), "Eliminación de cadmio(ii) de efluentes urbanos tratados mediante procesos de bioadsorción: el efecto competitivo de otros metales pesados". *Tesis de Master*. Universidad Politécnica de Cartagena.

- [13]I. Reyes (2014). “Adsorción de cobre, hierro y mercurio empleando *Chondracanthus chamissoi*”. *Tesis Doctoral*. Universidad Nacional de Trujillo.
- [14]O. Higuera (2019). “Reducción del cromo contenido en efluentes líquidos de la industria del cuero, mediante un proceso adsorción – desorción con algas marinas”. *Scientia et Technica*. (29) 115-120.
- [15]M. Kennish (1992). *Ecology of Estuaries. Anthropogenic effects*. CRC. Press. Inc., Boca Raton F., 1.
- [16]J. Duffus (1983). *Toxicología Ambiental*. Editorial. Omega S. A. Barcelona. España.
- [17]J. Pérez (2013). “Metales pesados y calidad del agua residual en relación con el riego agrícola”. *In Memorias. XVII Congreso Nacional de Irrigación. Puerto Vallarta, Jal* (Vol. 2).
- [18]J. La Dou (1999). *Medicina Laboral y Ambiental*. 2ª. Edición. México: Ed. El Manual Moderno.
- [19]A. Alarcón (1994). “Contaminación minero metalúrgica del Lago Chinchaycocha y del Río Mantaro. La Oroya”. *Instituto para el Desarrollo de la Pesca y la Minería* IPEMIN.
- [20]N. Cuizano (2008). Biosorción de metales pesados por algas marinas: posible solución a la contaminación a bajas concentraciones. *In Anales de Química* (Vol. 104, No. 2).
- [21]D. Onyancha (2008). Studies of chromium removal from tannery wastewaters by algae biosorbents, *Spirogyra condensata* and *Rhizoclonium hieroglyphicum*. *Journal of Hazardous Materials*, 158(2), 605-614.
- [22]J. Seader (2006). *Membrane separations. Separation Process Principles*, John Wiley & Sons, New York, NY, 512-513.
- [23]S. Klimmek (2001). Comparative analysis of the biosorption of cadmium, lead, nickel, and zinc by algae. *Environmental science & technology*, 35(21), 4283-4288.
- [24]W. Carbajal (2005). Informe Anual 2006. Seguimiento e investigaciones de las pesquerías artesanales. Lambayeque. Instituto del Mar del Perú.
- [25]R. Villares (2002). Seasonal variation and background levels of heavy metals in two green seaweeds. *Environmental Pollution*, 119(1), 79-90.
- [26]O. Raize (2004). Mechanisms of biosorption of different heavy metals by brown marine macroalgae. *Biotechnology and bioengineering*, 87(4), 451-458.
- [27]P. Sheng (2004). Sorption of lead, copper, cadmium, zinc, and nickel by marine algal biomass: characterization of biosorptive capacity and investigation of mechanisms. *Journal of colloid and interface science*, 275(1), 131-141.
- [28]A. Navarro (2006). Elucidación del efecto del pH en la adsorción de metales pesados mediante biopolímeros naturales: cationes divalentes y superficies activas. *Revista Iberoamericana de polímeros*, 7(2), 115-128.