



ORIGINAL ARTICLE / ARTÍCULO ORIGINAL

## LOW COST REMEDIATION METHOD TO REDUCE THE CONCENTRATION OF HEAVY METALS IN WATER CONTAMINATED BY MINING ACTIVITY

## MÉTODO DE REMEDIACIÓN DE BAJO COSTO PARA DISMINUIR LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS CONTAMINADAS POR LA ACTIVIDAD MINERA

Daniel Adolfo Alcántara-Malca<sup>1</sup> & Doris Esenarro-Vargas<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Industrial y de Sistemas. Universidad Nacional de Ingeniería Lima – Perú.  
Author for correspondence: danielalcantaram@gmail.com / desenarro1202@gmail.com

### ABSTRACT

The mining-related waters, which are discharged into natural bodies of water, generally contain heavy metals in concentrations that exceed the maximum permissible limits (MPL) or that exceed the environmental quality standards (EQS). Heavy metals at higher concentrations than permitted are very harmful for the life of human being, animals and plants of a locality or region bordering on the activity of the mining company. In this research, the application of a cheap unconventional chemical method using a weak base is proposed, complemented with a method using rice husk, to significantly reduce the concentration of heavy metals from water from the formal mining activity, in the mountains of Peru. First testing with simple solutions of known concentration of heavy metals and then testing more complex solutions of metals (with two or more metals). When soap dispersions of 90 mL to 110 mL are used, the percentages of heavy metal extraction range from 95% to 99% when there are mixtures of several heavy metals whose concentrations range from 13 mg·L<sup>-1</sup> to 114 mg·L<sup>-1</sup> and rice husk amounts vary from 2.0g to 3.25g, reaching pH 6.0 – 7.5.

**Keywords:** adsorption – alkali – bioremediation – concentration – contamination – ECA – heavy metal – LMP – rice husk – remediation

### RESUMEN

Las aguas de la actividad minera, las cuales se vierten a los cuerpos de agua naturales, generalmente contienen metales pesados en concentraciones que superan los límites máximos permisibles (LMP) o que superan los estándares de calidad ambiental (ECA). Los metales pesados en concentraciones más altas de lo permitido son muy perjudiciales para la vida del ser humano, los animales y las plantas de una localidad o región aledaña a la actividad de la empresa minera. En esta investigación de remediación se propone la aplicación de un método químico no convencional no costoso

usando una base débil, complementado con un método de biorremediación usando cascarilla de arroz, para disminuir significativamente la concentración de los metales pesados de las aguas provenientes de la actividad minera formal, en las serranías del Perú. Primero se ensayó con soluciones simples de concentraciones conocidas de metales pesados y luego se ensayó con soluciones más complejas de metales (con dos o más metales). Cuando se utilizaron dispersiones de jabón de 90 mL a 110 mL, los porcentajes de extracción de metales pesados oscilan en el rango de 95% a 99%. Cuando hay mezclas de varios metales pesados cuyas concentraciones oscilan en el rango de 13 mg·L<sup>-1</sup> a 114 mg·L<sup>-1</sup> y las cantidades de cascarilla de arroz oscilan de 2,0g a 3,25g, alcanzándose el pH a 6,0 – 7,5.

**Palabras clave:** adsorción – álcali – biorremediación – base – cascarilla de arroz – concentración – contaminación – LMP – metal pesado– remediación

## INTRODUCCIÓN

Los metales pesados son indestructibles y representan una amenaza, ya que no pueden ser degradados, ni química ni biológicamente, es decir, no son biodegradables y se pueden concentrar a lo largo de la cadena alimenticia y eventualmente bioacumularse en el cuerpo humano (Chuah *et al.*, 2005; Beltrán, 2015). Por ello, es imperativo desarrollar tecnologías innovadoras como las estrategias de biorremediación (Beltrán, 2015).

Además de los procedimientos químicos convencionales, una alternativa de descontaminación del agua es la utilización de residuos vegetales como la cascarilla de arroz (Trelles, 2013; De Gisi *et al.*, 2016), que ha sido ampliamente estudiada (Tejada *et al.*, 2015), y que gracias a sus características fisicoquímicas promete ser un buen adsorbente de metales pesados (De Gisi *et al.*, 2016; Llanos, 2016). Se han realizado diversos estudios de adsorción variando parámetros como tamaño de partícula, pH, tiempo de contacto y concentración de metal pesado; estas variables se deben controlar para garantizar una mayor eficiencia en el proceso (Chuah *et al.*, 2005; Doria *et al.*, 2011).

La Tabla 1 muestra la composición general de la cascarilla de arroz, donde se evidencia una gran proporción de celulosa. Doria *et al.* (2011), le atribuyen la capacidad de adsorción de la cascarilla de arroz a los compuestos lignocelulósicos que posee.

**Tabla 1.** Composición de la cascarilla de arroz.

Componente	% Abundancia	% promedio registrado
Celulosa	60,12	41,20
Hemicelulosa	11,19	21,00
Lignina	6,66	22,40
Cenizas	15,90	17,40

La mayoría de métodos reportados de extracción de metales pesados nos ilustran de que, la cascarilla de arroz tratada con ácidos y álcalis y transformada en cenizas con la correspondiente disminución del tamaño de partículas, logra extraer los metales pesados en porcentaje que superan el 90% (Chuah *et al.*, 2005; Doria *et al.*, 2011; Masoud *et al.*, 2016) Los tamaños de partículas de adsorción oscilan en el rango de 43µm a 500 µm hasta 0,30 mm, los tiempos de remoción reportados son de 10 min, 1 h, 120 min hasta 4 h y los valores de pH de máxima absorción para algunos cationes de metales pesados oscilan en el rango de 6,0 a 8, además, las cantidades de material adsorbente oscilan en el rango de 0,3 g·100 mL<sup>-1</sup> a 1,40 g·100 mL<sup>-1</sup> (Llanos *et al.*, 2016).

El presente trabajo experimental a escala de laboratorio, pretende aportar una solución parcial para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados resultantes de la actividad minera formal, la cual se puede adaptar a escala de planta piloto y planta industrial por las empresas mineras o por plantas de tratamiento de aguas de una localidad o región en concordancia con una adecuada gestión del agua en el Perú (Miyashiro *et al.*, 2014). Por ende, el objetivo fue proporcionar un método de remediación de bajo costo para disminuir la concentración de metales pesados en aguas contaminadas por la actividad minera.

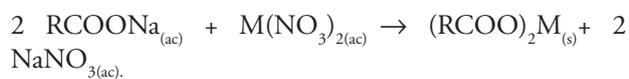
## MATERIAL Y MÉTODOS

La presente investigación es de naturaleza exploratoria en su parte experimental. Primero se ensayó con un jabón comercial de glicerina de una marca conocida (NEKO®), para ocasionar la precipitación de los metales pesados (jabones metálicos) y luego, se complementó la extracción de los metales pesados adicionando cascarilla de arroz natural (es decir, sin tratamientos químicos, ni calcinación). Luego, se ensayó con jabón sin excipientes (comprado a empresa productora de jabones) para ocasionar la precipitación, filtración y se complementó la extracción con la cascarilla de arroz ya mencionada.

La determinación cuantitativa de la concentración de metales pesados fue desarrollada por el Laboratorio de Espectrometría de Absorción Atómica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica (FIGMM) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Lima, Perú.

### Procedimiento Experimental

Se prepararon soluciones de metales pesados generalmente en el rango de 60 a 80 mg·L<sup>-1</sup>. Para la precipitación química se compró un jabón comercial, el cual se dispersó en agua destilada. Se seleccionó el jabón por ser una base débil que es mucho más barata que los álcalis fuertes NaOH y KOH. Por otro lado, Bailey (2001) menciona que es posible la obtención de jabones metálicos insolubles, por ejemplo, según la reacción general:



Comercialmente esta reacción se efectúa en gran escala en la manufactura de grasas lubricantes y reactivos metálicos para pinturas y otros recubrimientos protectores (Bailey, 2001); también se producen jabones metálicos más puros como palmitatos o estearatos de metales pesados a partir de grasas naturales como son el aceite de palma y el sebo de res (Galán, 2009). En la etapa complementaria de tratamiento, para la biosorción se seleccionó un residuo sólido vegetal como la cascarilla de arroz por su abundancia, su bajo costo y porque se puede aplicar directamente sin procesos de deshidratación o adaptación.

Cascarilla de arroz: Se emplearon para la cascarilla de arroz los siguientes tres tratamientos: A = 1,0g B = 1,5g C =2,0g.

Mezclas: Se efectuaron las siguientes mezclas de metales:

Mezcla I: Zn<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Pb<sup>2+</sup>.

Mezcla II: Mn<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Pb<sup>2+</sup>.

Mezcla III: Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Pb<sup>2+</sup>.

Mezcla IV: Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Pb<sup>2+</sup>.

Mezcla V: Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Pb<sup>2+</sup>.

Mezcla VI: Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Pb<sup>2+</sup>.

Mezcla VII: Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> y Pb<sup>2+</sup>.

Aspectos éticos: los autores declaran que se cumplieron todos los aspectos éticos nacionales e internacionales.

## RESULTADOS

Ensayo 1: Determinación de la máxima cantidad de cascarilla para la biosorción de metal pesado

A 100 mL de la solución de metal pesado se le adicionó primero la cascarilla de arroz y se agitó por 40 min, luego al sistema se le añadió la dispersión de jabón hasta la formación de un precipitado que luego se filtró. Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Resultados de Ensayo 1: Determinación de la máxima cantidad de cascarilla para la biosorción de metal pesado. Cascarilla de arroz: A = 1,0g B = 1,5g C =2,0g.

Muestra	Cu (mg·L <sup>-1</sup> )	%Extracción
Cu inicial	61,99	
Cu A	31,33	49,44
Cu B	26,63	57,02
Cu C	23,21	62,55
Muestra	Pb (mg·L <sup>-1</sup> )	%Extracción
Pb inicial	65,52	
Pb B	16,41	74,94
Pb C	12,00	81,68
Muestra	Zn (mg·L <sup>-1</sup> )	%Extracción
Zn inicial	75,55	
Zn A	47,71	36,84
Zn B	39,78	47,34
Zn C	21,66	58,08
Muestra	Mn	%Extracción
Mn inicial	71,85	
Mn A	43,42	39,56
Mn B	43,43	39,55
Mn C	43,23	39,83

En todos los casos se observa que la mayor disminución de la concentración del metal pesado se obtiene con 2,0 g de cascarilla de arroz para 100 mL de solución acuosa de cada metal.

Luego, se aplicó este dato de la masa de cascarilla de arroz (2,0g), para la determinación del porcentaje de extracción de hierro, tal como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Porcentaje Extracción de Hierro.

Muestra	Fe (mg·L <sup>-1</sup> )	%Extracción
Fe inicial	83,894	
Fe A	23,259	72,27
Fe B	19,915	76,26
Fe C	19,594	76,64

Determinación del tiempo promedio de agitación para biosorción con cascarilla de arroz.

Para determinar el tiempo promedio de agitación de la muestra con 2,0 g de cascarilla de arroz, sin adición de dispersión de jabón, se utilizó como referencia las soluciones en que hubo mayor % extracción de metal. Es decir, se utilizó soluciones de hierro y de plomo, lo cual se observa en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Porcentaje de adsorción vs tiempo.

Muestra	Fe (mg·L <sup>-1</sup> )	Cond (μS·cm <sup>-1</sup> )	%Extracción
Fe inicial	83,89	360	
Fe 5 min	40,62	804	51,58
Fe 15 min	36,14	830	56,92
Fe 25 min	34,69	837	58,65
Fe 35 min	34,54	827	58,82
Muestra	Pb (mg·L <sup>-1</sup> )		% Extracción
Pb inicial	66,28	99,2	
Pb 10 min	26,94	255	59,35
Pb 20 min	18,81	276	71,62
Pb 30 min	13,27	295	79,97
Pb 40 min	13,15	320	80,15
Pb 50 min	12,38	306	81,32
Pb 55 min	12,92	302	80,50
Pb 60 min	12,05	315	81,82
Pb 65 min	13,02	316	80,35

Se observa que las concentraciones de hierro y plomo prácticamente se vuelven constantes a partir de 35 min y 50 min, respectivamente, con 2,0 g de cascarilla de arroz. Considerando los resultados del ensayo 1 (Tabla 1) y los resultados de la Tabla 4 y, teniendo en cuenta que uno de los objetivos de la investigación es disminuir los tiempos de operación o aplicación, se decidió adoptar un tiempo de 45 min de adsorción con 2,0 g de cascarilla de arroz.

Ensayo 2: Para confirmar la masa máxima de cascarilla de arroz, las soluciones de 100 mL con metales pesados fueron tratadas con dispersión de jabón comercial hasta un pH de 6,0 - 6,5 y luego se practicó la adsorción con 1,0 g, 1,5 g y 2 g de cascarilla de arroz para luego ser agitadas por un tiempo de 45 min. Luego, se procedió a la filtración correspondiente. Los resultados de la aplicación se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Resultados de Ensayo 2. Cascarilla de arroz: A = 1,0g B = 1,5g C =2,0g.

Muestra	Cu (mg·L <sup>-1</sup> )	%Extracción
Cu inicial	62,26	
Cu A	20,31	67,36
Cu B	18,70	69,95
Cu C	14,58	76,57
Muestra	Pb (mg·L <sup>-1</sup> )	%Extracción
Pb inicial	61,11	
Pb A	4,30	92,96
Pb B	2,76	95,48
Pb C	1,95	96,80
Muestra	Zn (mg·L <sup>-1</sup> )	%Extracción
Zn inicial	69,64	
Zn A	20,00	71,27
Zn B	19,64	71,79
Zn C	16,41	76,43
Muestra	Mn (mg·L <sup>-1</sup> )	%Extracción
Mn inicial	70,86	
Mn A	45,56	35,710
Mn B	44,19	37,64
Mn C	29,38	58,53

Ensayo 3: Mezcla de metales: En este caso primero tratamos las muestras de mezclas de metales pesados con diferentes cantidades de dispersión de jabón sin excipientes, para ocasionar la precipitación de los jabones metálicos y determinar el porcentaje de extracción sin el uso de cascarilla de arroz (Tablas 6 al 11).

Mezcla I: Zn<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Pb<sup>2+</sup>.

**Tabla 6.** Resultados de mezcla I: Zn<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Pb<sup>2+</sup>.

Muestra	mL jabón	Zn (mg·L <sup>-1</sup> )	Fe (mg·L <sup>-1</sup> )	Pb (mg·L <sup>-1</sup> )
Inicial	-	119,54	19,93	21,51
A	15	75,63	3,39	17,24
B	25	74,66	1,77	13,06
C	35	68,18	1,34	13,03
D	45	65,66	2,27	11,50
E	55	62,02	0,73	9,76
		%Zn extracción	%Fe extracción	%Pb extracción
A	15	36,73	82,99	19,85
B	25	37,54	91,11	39,28
C	35	42,96	93,27	39,42
D	45	45,07	88,61	46,53
E	55	48,11	<b>96,33</b>	54,62

Mezcla II: Mn<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Pb<sup>2+</sup>.

**Tabla 7.** Resultados de Mezcla II: Mn<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Pb<sup>2+</sup>.

Muestra	mL jabón	Mn (mg·L <sup>-1</sup> )	Fe (mg·L <sup>-1</sup> )	Pb (mg·L <sup>-1</sup> )
Inicial	-	76,02	23,07	24,90
A	20	58,96	2,27	14,46
B	25	46,91	2,88	14,34
C	30	44,64	3,97	13,05
D	35	34,85	4,16	10,84
E	40	25,74	6,40	11,70
F	50	46,91	6,15	8,94
		%Mn	%Fe	%Pb
		extracción	extracción	extracción
A	20	22,44	<b>90,16</b>	41,92
B	25	38,29	87,5	42,40
C	30	41,27	82,79	47,59
D	35	54,15	81,96	56,46
E	40	66,14	72,25	53,01
F	50	38,29	73,34	64,09

Mezcla III: Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Pb<sup>2+</sup>.**Tabla 8.** Resultados de Mezcla III: Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Pb<sup>2+</sup>.

Muestra	mL jabón	Cu (mg·L <sup>-1</sup> )	Fe (mg·L <sup>-1</sup> )	Pb (mg·L <sup>-1</sup> )
Inicial	-	92,39	22,64	21,45
A	15	82,18	1,88	18,07
B	20	78,67	1,86	17,90
C	25	76,43	2,45	15,42
D	30	75,85	4,35	14,68
E	35	70,79	4,82	16,29
F	40	70,51	3,06	13,95
G	75	17,43	5,05	2,22
H	100	6,81	5,92	1,88
		%Cu	%Fe	%Pb
		extracción	extracción	extracción
A	15	10,21	<b>91,69</b>	15,75
B	20	14,85	91,78	16,55
C	25	17,27	89,17	28,11
D	30	17,90	80,78	31,56
E	35	23,37	78,71	24,05
F	40	23,68	86,48	34,96
G	75	81,13	77,59	89,65
H	100	<b>92,63</b>	73,85	<b>91,23</b>

Mezcla IV: Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Pb<sup>2+</sup>.**Tabla 9.** Resultados de mezcla IV: Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Pb<sup>2+</sup>.

Muestra	mL jabón	Cu (mg·L <sup>-1</sup> )	Zn (mg·L <sup>-1</sup> )	Fe (mg·L <sup>-1</sup> )	Pb (mg·L <sup>-1</sup> )	
Inicial	-	91,38	111,92	35,87	13,04	
A	20	71,64	79,05	4,76	9,86	
B	25	69,47	78,40	4,02	9,30	
C	30	65,85	76,61	4,96	7,56	
D	35	61,27	73,36	5,98	8,02	
E	40	52,97	73,63	3,61	5,38	
F	50	45,13	68,62	4,33	5,71	
G	60	32,75	67,68	1,15	3,27	
H	70	15,55	62,55	1,30	2,61	
I	80	4,56	41,28	6,32	4,54	
		extracción	%Cu	%Zn	%Fe	%Pb
A	20	21,60	29,36	86,72	24,38	
B	25	23,97	29,94	88,79	28,68	
C	30	27,97	31,54	86,17	42,02	
D	35	32,95	34,45	83,32	38,49	
E	40	42,03	34,21	89,93	58,74	
F	50	50,61	38,68	87,92	56,21	
G	60	64,16	39,52	<b>96,79</b>	74,92	
H	70	82,98	44,11	96,31	79,98	
I	80	<b>95,00</b>	63,11	82,38	65,18	

Mezcla V: Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Pb<sup>2+</sup>.**Tabla 10.** Resultados de Mezcla V: Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Pb<sup>2+</sup>.

Muestra	mL jabón	Cu (mg·L <sup>-1</sup> )	Zn (mg·L <sup>-1</sup> )	Mn (mg·L <sup>-1</sup> )	Fe (mg·L <sup>-1</sup> )	Pb (mg·L <sup>-1</sup> )	
inicial	-	87,93	114,35	90,12	32,03	7,54	
A	25	75,58	81,71	74,38	5,84	6,47	
B	35	69,56	78,42	69,45	9,10	4,25	
C	45	62,96	76,41	63,77	4,10	3,98	
D	60	39,69	70,82	60,46	3,45	1,77	
E	80	4,01	62,54	53,70	2,27	1,87	
F	100	0,38	27,08	43,07	2,52	0,01	
G	125	2,15	7,79	34,38	4,97	3,13	
		%Extracción	%Cu	%Zn	%Mn	%Fe	%Pb
A	25	17,45	28,54	17,46	81,76	14,19	
B	35	20,89	31,15	24,04	71,58	43,63	
C	45	28,39	33,17	29,23	87,19	47,21	
D	60	60,54	38,06	32,91	89,22	76,52	
E	80	95,43	45,32	40,41	92,81	75,19	
F	100	99,56	76,31	52,20	92,13	99,86	
G	125	97,55	93,18	61,25	84,48	58,42	

Mezcla VI: Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Pb<sup>2+</sup>.

**Tabla 11.** Resultados de Mezcla VI: Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Pb<sup>2+</sup>.

Muestra	mL jabón	Cu (mg·L <sup>-1</sup> )	Fe (mg·L <sup>-1</sup> )	Pb (mg·L <sup>-1</sup> )
Inicial		89,60	80,61	95,68
A	10	78,49	30,21	78,88
B	20	66,71	14,23	72,63
C	30	66,54	11,45	65,94
D	40	62,33	7,89	61,47
E	50	55,71	2,78	52,63
F	60	47,69	6,41	39,42
G	75	16,23	3,07	8,02
H	85	12,67	4,25	9,37
I	100	7,13	5,57	5,37
		%Cu	%Fe	%Pb
		extracción	extracción	extracción
A	10	12,39	62,52	17,55
B	20	25,54	82,34	24,09
C	30	25,73	85,79	31,08
D	40	30,43	90,21	35,75
E	50	37,82	<b>96,55</b>	44,99
F	60	46,77	92,04	58,80
G	75	81,88	96,19	91,61
H	85	89,6	94,72	90,20
I	100	<b>92,00</b>	93,09	<b>93,09</b>

Ensayo 4: En esta parte, muestras de 100 mL conteniendo varios cationes de metales pesados se hicieron reaccionar primero con diferentes cantidades de dispersiones de jabón, luego se procedió a filtrar obteniéndose las soluciones que fueron agitadas con diferentes cantidades de cascarilla natural de arroz (Tabla 12).

Mezcla VII: Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> y Pb<sup>2+</sup>.

**Tabla 12.** Resultados de Mezcla VII: Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> y Pb<sup>2+</sup>.

M	mL jabón	Cu (mg·L <sup>-1</sup> )	Zn (mg·L <sup>-1</sup> )	Mn (mg·L <sup>-1</sup> )	Fe (mg·L <sup>-1</sup> )	Pb (mg·L <sup>-1</sup> )
C <sub>c</sub>		17,82	22,0	32,34	13,1	14,1
A	10	5,92	15,4	20,15	0,21	1,54
B	15	1,85	3,28	8,84	0,27	0,45
C	25	0,93	2,06	9,13	0,39	0,48
D	35	0,88	0,37	2,33	0,42	0,63
E	45	1,39	0,50	1,66	0,84	1,81
F	55	0,86	0,52	0,68	1,28	1,00
G	70	1,51	0,56	0,56	0,97	1,45
H	90	1,46	0,76	0,85	0,96	1,04
I	110	0,65	0,59	0,68	0,53	0,65
		extracción	%Cu	%Zn	%Mn	%Fe
A	1g	66,77	29,7	37,69	<b>98,39</b>	89,1
B	1,5	81,5	85,0	72,66	97,9	<b>96,8</b>
C	1,75	94,78	90,6	71,76	97,0	96,6
D	2,00	95,06	<b>98,3</b>	92,79	96,7	95,5
E	2,25	92,19	97,7	94,86	93,59	87,2
F	2,50	95,17	97,6	97,89	90,23	92,9
G	2,75	91,5	97,4	<b>98,26</b>	92,6	89,7
H	3,00	91,8	96,5	97,37	92,6	92,6
I	3,25	<b>96,3</b>	<b>97,3</b>	<b>97,89</b>	95,9	95,4

M de muestra y C de concentración inicial.

En la misma columna de la dispersión de jabón se indican las cantidades en gramos de cascarilla de arroz utilizados, luego de la filtración de los precipitados.

## DISCUSIÓN

De los ensayos 1 y 2, en que se experimentó primero la precipitación y luego la adición de cascarilla de arroz, sin previa filtración del precipitado, se observa que este procedimiento no es adecuado para maximizar la extracción de metal pesado, pero sí favorece la extracción de plomo con 96,80% de extracción tal como lo muestra la Tabla 5 del ensayo 2. Por otro lado, al utilizar la dispersión de jabón observamos que las conductividades eléctricas de las soluciones aumentan en vez de disminuir al bajar las concentraciones de los metales pesados, lo cual nos indica que el agua resultante de la filtración no es conveniente para utilizarla en agricultura o para bebida de animales (Miyashiro *et al.*, 2014).

Respecto a la insolubilidad de los jabones metálicos precipitados, el producto de hierro es el más insoluble, pues requiere la menor cantidad de dispersión de jabón para precipitar, y esto se evidencia por los altos porcentajes de extracción. Por otro lado, las presencias de otros cationes metálicos generalmente hacen que disminuyan los porcentajes de extracción de hierro, conforme aumenta la cantidad de dispersión de jabón sin excipientes, como se aprecia en las Tablas 11 y 12.

Además, a mayor cantidad de dispersión de jabón no solo precipitan en mayor cantidad los otros cationes metálicos, sino que se atenúa la solubilidad del hierro, pues no baja mucho la extracción de hierro. El manganeso (Mn) es el más soluble de los cationes metálicos y su extracción requiere mayores cantidades de dispersión de jabón y de mayores cantidades de cascarilla de arroz.

Mientras más semejantes son las concentraciones de los cationes metálicos pesados mayor será el porcentaje de precipitación y el porcentaje de extracción. En el caso de la muestra I, en la cual se obtienen los mayores porcentajes de extracción, se obtuvo un pH final de 7,5. Los resultados experimentales de las diferentes Tablas de resultados muestran que el jabón sin excipientes, es un buen agente precipitante de jabones metálicos, pues se obtienen porcentajes de extracción de diferentes metales que superan el 90%.

Los experimentos finales desarrollados demuestran que es posible disminuir significativamente la concentración de los cationes metálicos pesados, cuando se complementan un método químico de bajo costo con un método de biorremediación también de bajo costo, pues tanto el jabón como la cascarilla de arroz son mucho más baratos que las base o álcalis (NaOH, KOH o cal, CaO) y el

carbón activado utilizados en los métodos convencionales de tratamiento de aguas (Howe *et al.*, 2016; Masoud *et al.*, 2016).

Del análisis de las mezclas tratadas se concluye que la secuencia correcta del procedimiento experimental es: primero adicionar la dispersión de jabón sintetizado sin excipientes hasta conseguir pH que oscile en el rango de 6,0 a 7,5, luego filtrar y finalmente complementar la máxima extracción con la cascarilla natural de arroz (Masoud *et al.*, 2016), y agitando por 45 min, tal como se muestra en la Tabla 12 de la Mezcla VII.

Los jabones metálicos pesados que son residuos resultantes de la precipitación se pueden acumular y almacenar para su venta como componentes en la formulación de pinturas y lubricantes, además, la cascarilla de arroz utilizada en la adsorción (biosorción) (Hegazi, 2013; Masoud *et al.*, 2016) se puede vender para su uso en la formulación y producción de ladrillos con características particulares por los metales que contiene y por su alto contenido de sílice. En otras palabras, este método innovador no genera residuos que dañen el medio ambiente pues todo es aprovechable (Pauli, 2011).

El método que en este caso se propone es un procedimiento innovador pues, la idea central es abaratar costos y reducir los tiempos del proceso de adsorción del metal pesado, utilizando la cascarilla de arroz tal como la venden en el mercado sin pulverizarla o desmenuzarla y sin calcinarla que, complementa al tratamiento químico usando una base débil no convencional (jabón) en el tratamiento de aguas que contienen metales pesados (Hegazi, 2013; Masoud *et al.*, 2016).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bailey, A.E. 2001. *Aceites y grasas industriales*. p. 36. Ed. Reverté. Barcelona.
- Beltrán, M. 2015. Metales pesados (Cd, Cr y Hg): su impacto en el ambiente y posibles estrategias biotecnológicas para su remediación. *Revista I<sup>3+</sup>, Investigación, Innovación, Ingeniería*, 2: 82-112.
- Chuah, T.G.; Jumasiaha, A.; Katayon, I.A.S. & Choong, T.S.Y. 2005. Rice husk as a potentially low-cost biosorbent for heavy metal and dye removal: an overview. *Desalination*, 175: 305-316.

- De Gisi, S.; Lofrano, G.; Grassi, M. & Notarnicola, M. 2016. Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, 9: 10–40.
- Doria, M.; Hormaza, A. & Suarez, D. 2011. Cascarilla de arroz: material alternativo y de bajo costo para el tratamiento de aguas contaminadas con cromo (VI). *Gestión y Ambiente*, 14: 73-83.
- Galán C.J. 2009. *Síntesis y caracterización de carboxilatos metálicos*. Tesis. Universidad Politécnica de Catalunya. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6843/Resum.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hegazi, H.A. 2013. Removal of heavy metals from wastewater using agricultural and industrial wastes as adsorbents. *Housing and Building National Research Center Journal*, 9: 276–282
- Howe, K.J.; Hand, D.; Crittenden J.; Rhodes R. & Tchobanoglous, G. 2016. *Principios de tratamiento del agua*. pp. 153,604; 372,375. CENGAGE Learning. México, D.F.
- Llanos, P.O.; Rios-Navarro, A.; Jaramillo-Paez, C.A. & Rodríguez-Herrera, L.F. 2016. La cascarilla de arroz como una alternativa en procesos de descontaminación *Producción + Limpia*, 11: 150-160.
- Masoud, M.S.; El-Saraf, W.G.; Abdel-Halim, A.M.; Ali, A.E.; Mohamed, A.E.A. & Hasand, H.M.I. 2016. Rice husk and activated carbon for waste water treatment of El-Mex Bay, Alexandria Coast, Egypt. *Arabian Journal of Chemistry*, 9 (Suppl. 2): S1590-S1596.
- Miyashiro, V.; Méndez, L.A. & Orihuela, L. 2014. *Gestión del agua en el Perú: Uso, protección y tratamiento*. pp. 35-37. UNALM. Lima.
- Pauli, G. 2011. *La economía azul*. Metatemas Tusquets Ed. Barcelona.
- Tejada, T.C.; Villabona, O.A. & Garcés, J.L. 2015. Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico *Tecno Lógicos*, 18: 109-123.
- Trelles, J.A. 2013. *Biosorción de arsénico en medio acuoso empleando biomasa vegetal inerte*. Tesis. Universidad Nacional de Ingeniería. Perú.

Received December 8, 2018.

Accepted December 31, 2018.