

Elaboración de Bio-resina Intercambiadora de Cationes a partir de Cáscara de Plátano o Guineo para Eliminar Metales Pesados en Agua Contaminada

Alma Verónica García

Inga. Química, Docente Investigadora, Escuela de Ingeniería Química, ITCA-FEPADE Sede Central. Email: alma.garcia@itca.edu.sv

Resumen

Esta investigación tuvo por objetivo obtener una bio-resina intercambiadora de cationes utilizando cáscaras de guineo o plátano, la cual reduzca la concentración de metales pesados en agua contaminada. A esta bio-resina se le realizaron pruebas fisicoquímicas: densidad seca aparente, pH y solubilidad en agua y solventes orgánicos. Se evaluó su efectividad filtrando agua contaminada con metales pesados, tales como hierro, cromo y níquel (Fe^{3+} , Cr^{6+} y Ni^{2+}), variando las condiciones de tiempo de contacto, temperatura y el tipo de cáscara. La cuantificación de la concentración de los metales en el agua filtrada se llevó a cabo por espectrofotometría visible. Se llegó a la conclusión que la bio-resina obtenida es efectiva para disminuir la concentración de metales pesados en agua, teniendo especial afinidad química por el cromo hexavalente; metal pesado que logró remover arriba del 90%. Las condiciones óptimas de operación de la bio-resina son a 30°C y 90 minutos de tiempo de contacto con la muestra. Además, las pruebas fisicoquímicas, permitieron tipificarla preliminarmente como una resina de intercambio catiónico débil con un grado de entrecruzamiento bajo.

Palabras clave

Bio-resina, intercambio de cationes, metales pesados, espectrofotometría visible, residuos agrícolas.

Abstract

This research aimed to obtain a cation exchange bio-resin, using plantain or banana peels, that reduces the concentration of heavy metals in contaminated water. The bio-resin underwent physico-chemical tests like apparent dry density, pH, solubility in water and organic solvents. Its effectiveness was tested by filtering contaminated water with heavy metals such as iron, chromium and nickel (Fe^{3+} , Cr^{6+} and Ni^{2+}) and by varying contact time conditions, temperature and type of peel. The measure of concentration of metals in filtered water was taken through visible spectrophotometry. We concluded that the resulting bio-resin is effective in reducing the concentration of heavy metals in water, showing special chemical affinity with hexavalent chromium, a heavy metal that was able to remove above 90%. The bio-resin optimum working conditions are 30°C and 90 minutes of contact with the sample. Also, the physico-chemical tests allowed to preliminary typify it as a weak cation exchange resin with a low degree of crosslinking.

Keywords

Bio-resin, cation exchange, heavy metals, visible spectrophotometry, agricultural waste.

Introducción

Para nadie es un secreto que en El Salvador la calidad del agua es un problema socio-ambiental y que se ve afectada principalmente por desechos domésticos, industriales, agroindustrias y agrícolas. Uno de los antecedentes más trágicos de la historia ambiental reciente en nuestro país es la contaminación por plomo que ocasionó Baterías de El Salvador, mejor conocida como Récord, en el Sitio del Niño en San Juan Opico, La Libertad (Edith Julieta Campos, 2009).

Se entiende por metales pesados a un grupo cercano a los 40 elementos de la tabla periódica que tienen una densidad mayor o igual a 5 g/cm^3 . A diferencia de otros elementos que son esenciales para el crecimiento como el sodio (Na), potasio (K), magnesio (Mg), cobre (Cu), entre otros, los metales pesados pueden tener efectos tóxicos sobre las células, principalmente como resultado de su capacidad para alterar o desnaturalizar las proteínas (Marco Alejandro Cañas Navarro, 2013).

Recepción: 15/05/2016 - Aceptación: 15/06/2016

De acuerdo a Platt (Sánchez, 2001) los metales tienen tres vías principales de entrada en el medio acuático: a) La vía atmosférica, por la sedimentación de partículas emitidas a la atmósfera por procesos naturales o antropogénicos, b) La vía terrestre, producto de filtraciones de vertidos, de la escorrentía superficial de terrenos contaminados y otras causas naturales y c) La vía directa, la cual ocurre a consecuencia de los vertidos directos de aguas residuales industriales y urbanas a los cauces fluviales.

Los metales pesados no se eliminan de los ecosistemas acuáticos por procesos naturales porque no son biodegradables. Por este comportamiento bioacumulativo, son considerados como indicadores de la calidad del agua debido a su toxicidad.

Es así como nació el interés por esta investigación, que tuvo por objetivo general elaborar una resina intercambiadora de cationes utilizando cáscaras de guineo o plátano, la cual sirva para reducir metales pesados en agua contaminada. La pionera en este tipo de temas es la científica brasileña Milena Boniolo, doctora en ciencias químicas de la Universidad de Federal de Sao Carlos en Sao Paulo, Brasil, quien descubrió (Boniolo, 2008) que, luego de ser sometida a cierto proceso, la cáscara de plátano puede limpiar agua contaminada con metales pesados hasta en un 65%.

A nivel regional también se han hecho investigaciones, más que todo como trabajos de grado. Las que han arrojado resultados significativos son la realizada por estudiantes de Licenciatura en Química y Farmacia en la Universidad de El Salvador (Ana María Alvarado Chávez, 2013), que consistió en un estudio de la retención de plomo en agua a partir de cáscaras de *Musa sapientum* (banano) utilizadas como filtro, llegándose a la conclusión que la cáscara retiene más del 95% del plomo en el agua contaminada, y otra en la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la cual se demostró que dicha cáscara puede reducir la concentración del arsénico en aguas contaminadas hasta en un 80% (Alvarado, 2012).

En la cáscara de plátano existe un gran número de moléculas con carga negativa. Estas moléculas tienen un gran poder de atracción sobre la carga positiva de los metales pesados.

La cáscara de banano cuenta en su composición

química con grupos funcionales capaces de adsorber metales pesados, como el hidroxilo y el carboxilo, que se encuentran en la fibra cruda en forma de lignina, celulosa y hemicelulosa (Carrión, 2013). Esta hace que la cáscara pueda funcionar como una resina de intercambio iónico (García, 2011) a través del fenómeno conocido como fisiorción¹.

En este artículo se presenta la metodología utilizada, seguida de la descripción de la parte experimental, la cual incluye cómo se ha realizado la transformación de las cáscaras de plátano y guineo en una bio-resina intercambiadora de cationes, las pruebas fisicoquímicas a las que fue sometida, la comprobación de su efectividad por medio de la filtración de una muestra de agua con cantidades conocidas de metales pesados (cromo hexavalente, hierro (III) y níquel (II)). Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones.

Desarrollo

1. METODOLOGÍA

Es una investigación de tipo experimental y retrospectiva por tener como objeto de estudio la manipulación de variables experimentales bajo condiciones controladas, además de poseer un carácter exploratorio, pues se realiza con el propósito de obtener datos fieles y seguros para que sirvan de base en estudios futuros. Todas las determinaciones y caracterizaciones se hicieron por duplicado y se calcularon los promedios para reportar los resultados.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Se realizó en las siguientes etapas.

2.1 Recolección y tratamiento de cáscara de plátano o guineo maduros.

La mayor parte de las cáscaras tanto de plátano (*Musa balbisiana*), como de guineo (*Musa paradisíaca*) fueron suministradas por la Cafetería Escuela de ITCA-FEPADE, pues son desechos de sus actividades diarias; se aprovechó esta circunstancia para asegurarse de una provisión diaria y de volumen considerable. Las cáscaras fueron secadas y tratadas como puede apreciarse en la Figura 1.

⁽¹⁾ Aquel por medio del cual, un elemento o compuesto químico, se adhiere a una superficie, que puede estar formada por el mismo tipo de compuesto o por alguno diferente, y en el que la especie adsorbida (fisisorbida) conserva su naturaleza química (Wikipedia)



Fig. 1. Recolección, secado y triturado de las cáscaras de guineo y plátano. [Elaboración propia]

2.2 Elaboración de muestras de agua con concentraciones conocidas de los Metales Pesados de estudio.

Se elaboraron 4 litros de muestra de agua, con concentración de 20 ppm de los siguientes metales: Fe (III), Ni (II) y Cr (VI); se añadió ácido nítrico para conservar su estabilidad y se almacenó en refrigeración. Se prepararon de la siguiente manera:

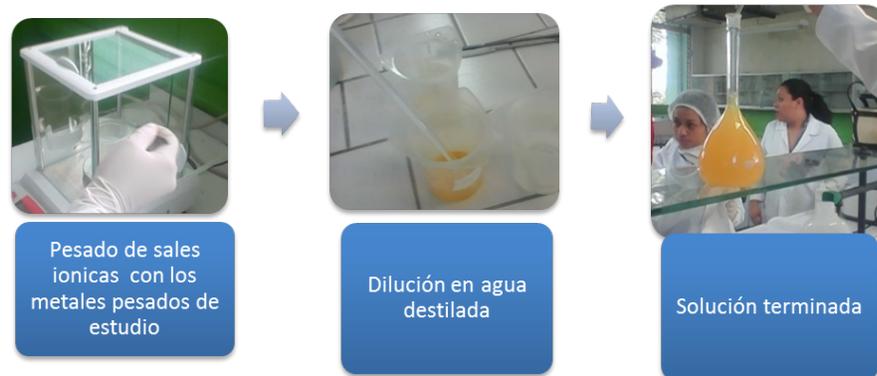


Fig. 2. Elaboración de muestra de agua con metales pesados. [Elaboración propia]

2.3 Elaboración del filtro con la bio-resina, cacterización y pruebas de efectividad.

Se utilizaron columnas cromatográficas como soporte para la bio-resina. En ellas se dispuso la cantidad necesaria de bio-resina a utilizar, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura:



Fig. 3. Filtros elaborados con la bio-resina. [Elaboración propia]

2.3.1 Caracterización de la bio-resina.

Determinación de pH. Se determinó el pH de la bio-resina, por el método potenciométrico, utilizando 2 gramos de muestra de bio-resina.

Densidad aparente seca. Se hizo por método gravimétrico; se pesó una probeta vacía; luego se llenó la probeta con la bio-resina hasta la marca de 10 cm³ y se calculó la densidad promedio.

Solubilidad en agua. Se pesaron 2 gramos de resina en un beacker de 50 ml; se agregaron 20 ml de agua destilada; se agitó y se dejó reposar. Se repitió el mismo procedimiento utilizando etanol y bencina de petróleo. Finalmente se reportó como soluble o insoluble.

2.3.2 Pruebas de efectividad de la bio-resina.

En todas las pruebas el volumen de muestra utilizado por cada filtro fue de 100 ml.

Cantidad de bio-resina. Se buscó comprobar si la cantidad de bio-resina influye en el porcentaje de remoción de metales pesados en una muestra de agua; para ese efecto se hicieron pruebas, una utilizando 20 gramos de la bio-resina y otra con 30 gramos, distribuidas en los filtros como se pueden apreciar en la Figura 3. Se recolectó y guardó el filtrado en frascos ámbar, los cuales se almacenaron en refrigeración para su posterior análisis.

Tiempo de contacto. De la misma forma se trató de valorar la influencia del tiempo de contacto de la muestra de agua en la capacidad de remoción de metales de la bio-resina. Esta prueba se realizó en paralelo al experimento anterior, con las mismas cantidades de bio-resina descritas en el apartado que precede. Se agregaron 100 ml de muestra de agua a cada filtro. Variando los tiempos de contacto en 30 ó 90 minutos. Al completar el tiempo respectivo, se abrió la válvula de la columna y se evacuó su contenido.

Temperatura. También se realizaron pruebas de filtración cambiando la temperatura (30 °C, 40 °C y 50 °C) y el tipo de cáscara (guineo o plátano).

2.3.3 Cuantificación de metales pesados después de la filtración.

Una vez recolectados todos los filtrados, se cuantificó la concentración de metales pesados en un espectrofotómetro visible; para el níquel se utilizó el método de la dimetilgloxima (DMG), se midieron las absorbancia a 463 nm; para el hierro, el método de la fenantrolina, con una longitud de onda de 510 nm y para el cromo hexavalente, se basó en la reacción del mismo con 1,5-difenilcarbazida en medio ácido y se midió espectrofotométricamente a una longitud de onda de 543 nm. En todos los casos no se utilizaron soluciones estándares, pues se hizo uso de kits de reactivos listos para usar en métodos pre programados en el espectrofotómetro visible.

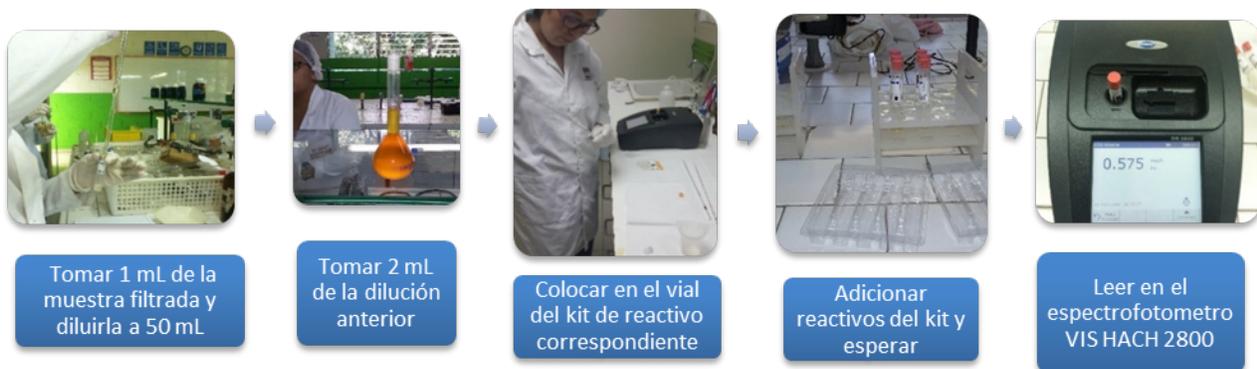


Fig. 4. Determinación de concentración de metales pesados en la muestra de agua filtrada. [Elaboración propia]

3. Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos después de haberle practicado a la bio-resina todas las pruebas que se describieron en el apartado anterior.

3.1 Caracterización de la bio-resina

PARÁMETRO	BIO-RESINA DE PLÁTANO		BIO-RESINA DE GUINEO	
<i>pH</i>	5.2		4.8	
SOLUBILIDAD EN AGUA	Insoluble		Insoluble	
SOLUBILIDAD EN OTROS SOLVENTES	Bencina de petróleo	Etanol	Bencina de petróleo	Etanol
	Insoluble en ambos solventes		Insoluble en ambos solventes	
DENSIDAD	362.33 gr/l		352.00 gr/l	

Tabla 1. Resultados de pruebas fisicoquímicas de bio-resina de plátano y de guineo. [Elaboración propia].

3.2 Cantidad de bio-resina y tiempo de contacto.

La concentración inicial de hierro, níquel y cromo en la muestra de agua era de 20 partes por millón (ppm)

Filtrado	Tiempo de contacto (minutos)	Cantidad de bio-resina (g)	Concentración inicial de metales (ppm) en la muestra de agua	Concentración de los metales después del filtrado (ppm) ²			Porcentaje ³ (%) de reducción de metales en la muestra		
				Fe ³⁺	Cr ⁶⁺	Ni ²⁺	Fe ³⁺	Cr ⁶⁺	Ni ²⁺
1	60	20.00	20.00	7.87	5.12	16.16	60.64	74.38	19.19
2	90	20.00	20.00	5.56	2.48	14.60	72.22	87.63	27.00
3	60	30.00	20.00	7.68	4.08	18.58	61.61	79.62	7.13
4	90	30.00	20.00	5.69	3.52	15.98	71.55	82.34	20.13

Tabla 2. Resultados de pruebas de tiempo de contacto y cantidad de bio-resina en el filtrado de agua contaminada. [Elaboración propia].

(2) ppm: partes por millón (miligramos por cada litro de solución)

(3) Porcentajes en masa.

3.3 Tipo de bio-resina.

Puesto que en las pruebas anteriores, para un tiempo de contacto de 90 minutos, se observó que con 20 gramos de bio-resina se obtuvieron mayores porcentajes de remoción, se optó por hacer esta prueba con esa cantidad de bio-resina en cada filtro, los resultados se presentan a continuación:

	No prueba	Concentración inicial de metales (ppm) en la muestra de agua	Concentración de los metales después del filtrado (ppm)			Porcentaje (%) de reducción de metales en la muestra		
			Fe ³⁺	Cr ⁶⁺	Ni ²⁺	Fe ³⁺	Cr ⁶⁺	Ni ²⁺
BIO-RESINA OBTENIDA DE CÁSCARA DE GUINEO	1	20.00	3.88	0.72	16.77	80.62	96.38	16.15
	2		6.32	0.68	16.15	68.38	96.63	19.25
	PROMEDIO		5.10	0.70	16.46	74.5	96.51	17.7
BIO-RESINA OBTENIDA DE CÁSCARA DE PLÁTANO	1	20.00	14.38	1.75	14.92	28.125	91.25	25.4
	2		10.75	2.50	16.08	46.25	87.5	19.63
	PROMEDIO		12.56	2.12	15.50	37.19	89.38	22.51

Tabla 3. Resultados de remoción de metales pesados utilizando como medio filtrante bio-resina obtenida de cáscara de guineo y cáscara de plátano. [Elaboración propia].

3.4 Variación de temperatura.

Por las mismas razones que se explicaron en el apartado anterior, la cantidad de bio-resina en cada filtro fue de 20 gramos.

	Temperatura de prueba (° C)	Concentración inicial de metales (ppm) en la muestra de agua	Concentración de los metales después del filtrado (ppm)			Porcentaje (%) de reducción de metales en la muestra		
			Fe ³⁺	Cr ⁶⁺	Ni ²⁺	Fe ³⁺	Cr ⁶⁺	Ni ²⁺
BIO-RESINA OBTENIDA DE CÁSCARA DE GUINEO	30 °C	20.00	1.84	0.92	13.60	90.82	95.38	32.00
	40 °C	20.00	6.98	0.95	13.00	65.13	95.25	35.00
	50 °C	20.00	8.85	1.22	13.25	55.75	93.88	33.75
BIO-RESINA OBTENIDA DE CÁSCARA DE PLÁTANO	30 °C	20.00	14.30	1.70	16.35	28.5	91.5	18.25
	40 °C	20.00	15.24	2.75	17.35	23.82	86.25	13.25
	50 °C	20.00	19.25	2.72	17.75	3.75	86.38	11.25

Tabla 4. Comparación del impacto de la variación de la temperatura en la reducción de la concentración (ppm) de metales pesados utilizando como medio filtrante bio-resina obtenida de cáscara de guineo y cáscara de plátano. [Elaboración propia]

4. Análisis de los resultados

Las caracterizaciones realizadas en el laboratorio tienen como finalidad determinar algunos parámetros físico-químicos de la bio-resina, tales como: densidad, potencial de hidrógeno y solubilidad en agua y solventes orgánicos para que, de esta manera, se pueda establecer una comparación con otras resinas de intercambio iónico existentes en el mercado.

Solubilidad en agua y otros solventes. Las resinas de intercambio iónico son materiales macromoleculares insolubles en agua, pero una característica distintiva es su solubilidad en alcohol. El experimento de laboratorio se realizó a temperatura ambiente y demostró que la bio-resina, tanto de plátano como de guineo, es insoluble en agua, alcohol y bencina de petróleo. Posteriores experimentos a distintas temperaturas serían útiles para corroborar solubilidad en alcoholes.

Carácter y tipo de bio-resina. Otro punto a considerar es el carácter ácido o básico de la bio-resina. En el caso particular de la biomasa de las cáscaras de plátano y guineo se trata de una resina de carácter ácido (pH promedio de ambas bio-resinas = 5). Además, tomando como referencia investigaciones previas como la de la Dra. Boniolo, se sabe que posee un grupo carboxilo unido a una matriz de un polímero tridimensional (lignina). Esto, más las pruebas en el agua filtrada con la bio-resina, permite tipificarla como una resina de intercambio catiónico débil.

Densidad aparente seca. La densidad aparente seca de una resina se expresa en masa de resina por volumen (gr/l). El valor promedio obtenido de ambas bio-resinas es de 339.17 gr/l; se puede decir que es relativamente bajo, si se compara con resinas de intercambio iónico sintéticas y que actualmente se comercializan en el mercado. De acuerdo con fichas técnicas consultadas en la web, éstas reportan valores de densidad aparente seca que oscilan en el rango comprendido entre 600 gr/l - 800 gr/l. Esto es debido a que se han desarrollado resinas más densas, con un mayor grado de entrecruzamiento para aplicaciones industriales más pesadas que el tradicional tratamiento de aguas. Esto lleva a suponer que la bio-resina tiene un grado de entrecruzamiento bajo, que podría resultar en una

estabilidad y selectividad baja. Estas dos últimas características podrían corroborarse con la realización de más pruebas a la bio-resina.

Sobre el efecto de la temperatura. En cuanto a la influencia de la temperatura de operación de la bio-resina, se determinó que a 30 °C el porcentaje de remoción fue levemente mayor en comparación con otras temperaturas (40 a 50 °C en la Tabla 4). Estudios anteriores sugieren que al trabajar con biomásas, como las cáscaras de frutas, en la remoción de metales pesados, la influencia de la temperatura al elevarse causaría un cambio en la textura del adsorbente y un deterioro del material (las cáscaras de plátano y guineo) que disminuiría la capacidad de adsorción de la bio-resina.

Sobre el efecto del tiempo de contacto. A mayor tiempo de retención, más eficiente la remoción de metales pesados. El tiempo de contacto óptimo (en el cual se presentó el mayor porcentaje de remoción de Fe³⁺, Cr⁶⁺ y Ni²⁺), según el experimento realizado en el laboratorio, fue de 90 minutos (Tabla 3).

Sobre la cantidad de bio-resina. Se determinó que los mejores resultados, en términos globales, se obtuvieron con 20.0 gramos de bio-resina dispuesta en los filtros, para el cromo hexavalente se retuvo arriba del 80%, del hierro (III) alrededor del 70% y para el níquel (II) el valor rondaba el 20%.

Sobre la selectividad de la bio-resina. La selectividad es la propiedad de los intercambiadores iónicos mediante la cual un intercambiador muestra mayor afinidad por un ion que por otro. La selectividad depende de la carga y el tamaño de los iones. La influencia más importante es la magnitud de la carga del ion, ya que una resina prefiere contraiones de elevada valencia. Este factor fue comprobado en el laboratorio con base en los resultados obtenidos y aun variando las condiciones de tiempo de contacto y temperatura de operación de la bio-resina. Se puede afirmar que el mayor porcentaje de remoción lo presentó el cromo hexavalente, seguido del ion hierro (III) y por último, el ion níquel (II). La selectividad (cualitativa) de la bio-resina quedaría representada de la siguiente manera: Cr⁶⁺ > Fe³⁺ > Ni²⁺.

Conclusiones

Con base en los resultados de las pruebas de laboratorio para caracterizar la bio-resina, se determinó que es insoluble en agua, bencina de petróleo y en etanol; que tiene un pH promedio de 5.0 (carácter ácido) y una densidad seca aparente de 355 gr/l, lo cual permite tipificarla, preliminarmente, como una resina de intercambio catiónico débil con un grado de entrecruzamiento bajo.

De la misma forma, las pruebas experimentales llevaron a que se concluya que las condiciones de operación óptima de la bio-resina, en las que se obtuvieron mayores porcentajes de reducción de metales pesados en la muestra de agua, son: 30°C y 90 minutos de tiempo de contacto, independientemente si la bio-resina provenía de cascara de plátano o de guineo.

Se determinó que la temperatura óptima de operación de la bio-resina fue de 30 °C. Después de analizar los filtrados de agua contaminada en el espectrofotómetro visible, se obtuvieron los siguientes porcentajes de reducción en la concentración de metales pesados: 93.44% Cr6+, 59.66 % Fe3+ y 25.13 % Ni2+; todos los porcentajes presentados son en base a masa, notándose que el metal pesado más sensible al efecto de la bio-resina fue el cromo hexavalente.

El tiempo de contacto óptimo resultó ser de 90 minutos, en el cual se presentaron los mayores porcentajes de remoción, los cuales fueron: 71.89% de Fe3+, 84.99 % de Cr6+ y 23.57 % de Ni2+. Nuevamente el cromo hexavalente fue el que presentó mayor afinidad con la bio-resina, siendo el metal pesado con el mayor porcentaje de remoción.

Conforme a los resultados de las pruebas de filtrado de agua contaminada con los metales pesados, utilizando bio-resina como filtro, la selectividad de la misma fue la siguiente: Cr6+ > Fe3+ > Ni2+. Este resultado es totalmente consistente con el comportamiento de otras resinas intercambiadoras de cationes, que prefieren la retención de contraiones de elevada valencia.

Una de las interferencias en el desarrollo experimental fue la causada por los pigmentos naturales, como los carotenos y xantofilas presentes en las cáscaras de guineo y de plátano, los cuales colorearon de pardo amarillo el agua al ser pasada por el filtro. Dicha interferencia se eliminó diluyendo la muestra de agua, hasta que no se detectó color.

Recomendaciones

- Realizar estudios posteriores sobre formas de extracción y reutilización de los metales pesados retenidos en la bio-resina.
- Realizar investigaciones para producir este tipo de bio-resina y su utilización en plantas de tratamiento de aguas industriales contaminadas con metales pesados.
- Someter la muestra de agua a un proceso de clarificación posterior al filtrado para evitar interferencias en las determinaciones analíticas causadas por la pigmentación del agua.
- Llevar a cabo nuevas investigaciones para identificar y probar otras bio-resinas naturales para la remoción de metales pesados en aguas industriales.

Referencias

ALVARADO, V. C. Evaluación del uso de la cáscara del banano (Musa AAA) variedad Williams para la remoción de arsénico en el agua para consumo humano. Guatemala: Universidad de San Carlos, 2012.

ALVARADO CháveZ, A.M. Estudio preliminar de la retención de plomo en agua a partir de cáscaras de musa sapientum (banano) utilizadas como filtro. San Salvador, El Salvador : Universidad de El Salvador, 2013.

BONIOLO, M. R. Biossorcao da uranio nas cascas de banana. Sao Paolo: Instituto de Pesquisas Energeticas e Nucleares, 2008.

CAMPOS, E. J. Caso contaminación por plomo ocasionado por la empresa Baterías de El Salvador. S.A de C.V y el proceso de lucha impulsado por la población afectada. San Salvador, El Salvador : Centro de Tecnología Apropiada, (CESTA), 2009.

CAÑAS Navarro, M. A. Evaluación de la toxicidad ocasionada por el exceso de micronutrientes en plantas de Arabidopsis thaliana. *Biológicas*, 1(14): 30-36, 2013.

CARRIÓN, K. M. Reutilización de residuo de la cáscara de banano (musa paradisiaca) y platanos (musa sapientum) para la producción de alimentos destinados al consumo humano. Guayaquil: Universidad de Guayaquil. 2013.

GARCÍA, R. I.). Reducción de cloruros y dureza mediante intercambio iónico, en agua de pozo. Sonora, México, F.F. : Universidad de Sonora, 2011.

SÁNCHEZ, L. C. Estudio de biosorción de metales pesados de un efluente de origen antropogénico utilizando Escherichia coli. Sonora, México, D.F. : Universidad de Sonora, 2001