

Determinación de metales pesados mediante el uso del *Artificial Mussel* bajo condiciones controladas de pH, salinidad y temperatura: Estudio de validación

Determination of heavy metals using the *Artificial Mussel* under controlled conditions of pH, salinity and temperature: Validation study

Alma Chen¹, Kathia Broce²

¹Centro Regional de Veraguas de la Universidad Tecnológica de Panamá, ²Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas de la Universidad Tecnológica de Panamá

¹alma.chen@utp.ac.pa, ²kathia.broce@utp.ac.pa

Resumen— Tradicionalmente, se han empleado organismos bivalvos para el monitoreo de la contaminación marino-costera debido a su notable capacidad para bioacumular metales pesados. Sin embargo, la concentración de éstos puede ser afectada significativamente por factores biológicos y físicos. Debido a las limitantes antes descritas, los investigadores Wu y Lau de la Universidad de Hong Kong, desarrollaron un dispositivo al que denominaron: “Artificial Mussel (AM)”. Este consiste en un polímero ligando capaz de acumular y liberar metales en respuesta a la concentración de éstos disueltos en el agua marina, permitiendo así su evaluación y comparación directa en diversos ecosistemas acuáticos.

Este dispositivo ha sido probado en el monitoreo de zonas costeras de Australia, Escocia, Sur África, Islandia y China, con bastante éxito; sin embargo, no ha sido utilizado aún en costas de zonas tropicales.

El presente estudio contempla la construcción y validación de la eficiencia de captura de los metales cadmio, cobre y cromo por parte del AM, bajo condiciones controladas de pH, salinidad y temperatura en el laboratorio, con la finalidad de obtener un dispositivo que pueda ser utilizado para el monitoreo de metales pesados en ambientes acuáticos tropicales, que genere datos confiables. Los resultados obtenidos muestran que a mayor tiempo de exposición y a mayor salinidad, la afinidad por los metales varía, encontrándose que el AM presenta una mayor afinidad por el Cu que por el Cd, con un máximo de captación a los 35 días de exposición y 20 días en estudios de corto plazo.

Palabras claves— Artificial mussel, bioindicadores, condiciones controladas, contaminación marina, metales pesados, selectividad, zonas costeras.

Abstract— Traditionally, bivalves' organisms have been employed to monitor marine-coastal contamination due to their remarkable ability to bioaccumulate heavy metals. However, the concentration of metals in the bivalves can be affected significantly by biological and physical factors. Due to this limitation, researchers Wu and Lau from the University of Hong Kong developed a device called: “Artificial mussel”. This device consists in a ligand polymer capable of accumulating and releasing metals in response to their concentration dissolved in marine water, allowing the evaluation and direct comparison in diverse ecosystems.

This device has been proved successfully in the monitoring of coastal zones in Australia, Scotland, South Africa, Iceland China, nevertheless, it has not been proved in tropical coastal zones.

This study includes the construction and validation of the capture efficiency of the metals cadmium, copper and chromium from the AM, under controlled conditions of pH, salinity and temperature in the laboratory, in order to obtain a device that can be used for the monitoring of heavy metals in tropical aquatic environments, generating reliable data. The results show that the greater the exposure time and higher salinity, affinity for metals varies, finding that the AM has a greater affinity for Cu than Cd uptake with a maximum of 35 days of exposure and 20 day in short-term studies.

Keywords— Artificial mussel, bioindicators, controlled conditions, marine contamination, heavy metals, selectivity, coastal zones.

Tipo de artículo: Original

Fecha de recepción: 12 de noviembre de 2015

Fecha de aceptación: 14 de diciembre de 2015

1. Introducción

Los metales pesados constituyen uno de los grupos de xenobióticos que afectan más negativamente a las zonas costeras, hábitat de la mitad de recursos pesqueros del planeta.

La creciente densidad de población y la rápida industrialización de las zonas costeras están afectando en gran

medida la calidad del medio marino. La contaminación, la sobreexplotación y la baja protección amenazan con dañar aún más los ecosistemas marinos, lo que lleva a grandes problemas de salud pública y pérdidas económicas (Tayeb et al., 2015).

En el campo de la contaminación ambiental del ecosistema marino y estuarino se emplean distintas especies de organismos vivos como bioindicadores, los moluscos y otros organismos filtradores, han sido empleados por los ecologistas debido a su capacidad de absorber y liberar metales a lo largo del tiempo, dando

de esta forma una idea acerca de los efectos cualitativos y cuantitativos provocados por los diversos agentes químicos que provocan cambios en la calidad del agua. Sin embargo, estos organismos son afectados por factores ambientales como la salinidad, la temperatura y biológicos como el tamaño, la edad reproductiva, y el sexo, así como por la disponibilidad de sitios de anclaje, limitándose de este modo su uso como biomonitor de contaminación (Wu & Lau, 1996).

Por lo tanto, los estudios de contaminación marina se benefician con la adopción y aplicación de tecnologías que proporcionen uniformidad en los resultados de bioacumulación de metal (Degger et al., 2011).

El *Artificial Mussel* (AM, por sus siglas en inglés) es un dispositivo de muestreo desarrollado por Wu & Lau (1996) con el objeto de proporcionar una metodología que superara las limitaciones presentadas por los indicadores biológicos, como lo son las estrategias de acumulación de contaminantes según la especie y la distribución biogeográfica de cada una de ellas. El AM es una herramienta alternativa para el monitoreo de la contaminación por metales o elementos traza en zonas costeras, debido a su capacidad de captación de metales en agua y liberación en soluciones ácidas, para posterior determinación.

Estudios han demostrado que los *Artificial Mussels* (AM) o moluscos artificiales no solo dan el tiempo aproximado de la concentración de metales, sino que también permiten la comparación de los niveles de metales en diferentes áreas geográficas más allá de los límites de distribución de los biomonitores (Wu y Lau, 1996).

En el presente trabajo, se ha desarrollado en el Laboratorio de Química del Centro Regional de Veraguas en colaboración con el Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH), ambos de la Universidad Tecnológica de Panamá, un prototipo de dispositivo para el monitoreo de elementos traza, basado en el diseño original de Wu y Lau (1996), para dar seguimiento al estudio en ambientes marino costeros y de agua dulce del Humedal de Importancia Internacional Golfo de Montijo.

Este dispositivo consiste en una resina de intercambio iónico (en este caso fue empleada la Chelex 100®), suspendida en agua marina artificial dentro de un tubo semipermeable. La membrana semipermeable, permite el paso de iones de los metales trazas (Cr, Cd, Cu), antes de ser quelados por la resina. Esta resina de intercambio

catiónico tiene alta preferencia para el cobre y otros metales pesados.

Para poder determinar los niveles de contaminación por metales o elementos traza, empleando estos dispositivos, en sitios como el Golfo de Montijo; se hizo necesario primeramente evaluar bajo condiciones controladas de salinidad, temperatura y pH, la capacidad de captación de metales y realizar un estudio de validación en el laboratorio. Los resultados de las pruebas analíticas realizadas son presentados en este trabajo.

2. Materiales y métodos

2.1 Pruebas de captación de metales por parte de los *Artificial mussels* bajo condiciones de laboratorio

Las metodologías empleadas en este estudio, fueron las empleadas por Wu y Lau (1996) con algunas pequeñas variantes.

2.1.1 Preparación de los *Artificial mussels*

Cien (100) *Artificial Mussels* (AM) fueron construidos a partir de tubos plásticos de aproximadamente 2.5 cm de diámetro, 6 cm de alto y abierto en ambos extremos; uno de los extremos fue cubierto con una película plástica, de aproximadamente 5 cm x 5 cm en tamaño, y fijada con una liga (banda de caucho).

Cien (100) ml de una solución que contenía 15 g de acrilamida y 0.5 g de N, N'-metilen-bis-acrilamida fue preparada utilizando un matraz volumétrico de 100 ml. Esta solución constituye el gel polimerizado que forma parte de la estructura de soporte del AM. A cada tubo plástico se le adicionaron 4 ml de la solución preparada de poliacrilamida, 160 µl de una solución al 10 % de peroxidisulfato de amonio (Esta solución actúa como iniciadora del proceso de polimerización) y 40 µl de TMEDA (N, N, N', N'-tetrametiletildiamina), la cual actúa como catalizador de la polimerización.

Añadidos estos dos últimos reactivos la polimerización se completaba dando una textura de gel en aproximadamente 5 minutos.

Después de terminada la polimerización, los tubos fueron colados en un contenedor con agua tridestilada (3-D) durante toda la noche. El propósito de colocar el tubo en agua 3-D es para permitir que el gel se hinche y se fije en el mismo.

Una vez fijado el gel en el tubo, se colocó un anillo plástico, de aproximadamente 2 cm de diámetro y 1 cm

de alto, dentro del mismo y fueron adicionados 0.2 ± 0.05 g de la resina Chelex® 100.

Se adicionó suficiente agua 3-D hasta que el anillo quedó totalmente inmerso.

Cada tubo fue sellado empleando una capa de gel de otro tubo, por el extremo descubierto. Ambos geles contenidos dentro del tubo fueron empujados desde los extremos hacia el centro del anillo plástico, asegurándose de que tocasen a este último.

Finalizado el paso anterior, la fabricación del AM ha sido completada encontrándose la resina Chelex® 100 encerrada dentro el tubo plástico con ambos extremos sellados por el gel permeable.

2.1.2 Experimento I

Estudio para investigar la captación de metales por parte del AM bajo diferentes concentraciones.

La determinación del potencial de captación de los metales cadmio, cobre y cromo por parte del AM (molusco artificial), fue realizada bajo condiciones controladas de pH, temperatura y salinidad, y a distintas concentraciones, dentro del laboratorio.

Los AM fueron distribuidos en diversos cubos que contenían diferentes concentraciones de los metales en estudio (Ver tabla 1). Cada cubo contenía 10 litros de agua con la siguiente concentración de metales:

Tabla 1. Concentración de elementos traza (metales) en mg/L, para ensayo de captación

Recipientes	Elementos traza (mg/L)		
	Cd	Cr	Cu
Cubo 1	0.10	0.05	0.05
Cubo 2	1.00	2.00	2.00
Cubo 3	5.00	10.00	10.00

Diez (10) AM fueron colocados sobre una rejilla plástica la cual fue sumergida dentro del cubo que contenía agua y distintas concentraciones de sales. Fue necesario airear cada cubo mediante una bomba para aumentar la circulación del aire dentro de los mismos. Todos los cubos fueron cubiertos para evitar la contaminación.

La afinidad de la resina Chelex® 100 hacia ciertos metales, está sujeta a la estructura de la misma, la cual podría verse afectada por variaciones en el pH,

en particular si el pH está por debajo de 4, la tasa de intercambio de la resina podría ser muy baja. Por consiguiente, el pH del agua en cada uno de los cubos fue monitoreado semanalmente durante el curso del experimento.

La concentración de metales fue monitoreada semanalmente también, adicionándose una cantidad apropiada de sales metálicas para mantener la concentración de estos.

Para fines de control de calidad, otros 10 AM fueron colocados en un cubo como los anteriormente descritos (Cubo control). El propósito de este control fue evaluar cualquier contaminación durante el experimento, manejo, preparación, almacenamiento y análisis químico de los AM.

Los AM de cada cubo fueron muestreados aleatoriamente y por duplicado (cubos 1-3 y control), en un intervalo de siete días.

2.2 Experimento II

Estudio para evaluar el efecto a corto plazo de la variación en la concentración de metales sobre la acumulación de metales por los *Artificial mussels* (AM).

Para esta fase de laboratorio, los AM fueron distribuidos en diversos cubos que contenían diferentes concentraciones de los metales en estudio (Ver tabla 2). Cada cubo contenía 10 litros de agua con la siguiente concentración de metales:

Tabla 2. Concentraciones de elementos traza (metales) en mg/L, para prueba de validación

Recipientes	Elementos traza (mg/L)		
	Cd	Cr	Cu
Cubo 4a	0.50	1.00	1.00
Cubo 4b	5.00	10.00	10.00
Cubo 5a	0.50	1.00	1.00
Cubo 5b	5.00	10.00	10.00

Diez (10) AM fueron colocados sobre una rejilla plástica la cual fue sumergida dentro del cubo que contenía agua y distintas concentraciones de sales. Fue necesario airear cada cubo mediante una bomba para aumentar la circulación del aire dentro de los mismos. Todos los cubos fueron cubiertos para evitar la contaminación.

Los AM fueron colocados en los cubos 4a y 4b alternativamente. Los AM fueron colocados en el cubo 4a la mayor parte del tiempo y transferidos al cubo 4b

por un período de 1 día en el día 2, día 9, día 16 y día 20.

De igual forma, 10 AM fueron colocados en los cubos 5a y 5b alternativamente. Los AM se mantuvieron en el cubo 5a la mayor parte del tiempo y transferidos al cubo 5b por un período de 1 día en el día 6, día 9, día 20 y día 23.

La concentración de los metales en los cubos 4a, 4b, 5a y 5b fue monitoreada semanalmente y se añadió una cantidad adecuada de sales para mantener la concentración a lo largo del período de experimento. El pH del agua fue monitoreado semanalmente para verificar la variación del mismo durante el curso del estudio.

Los AM fueron muestreados aleatoriamente por triplicado desde el cubo 4a/4b y 5a/5b en intervalos de 7 días hasta que el equilibrio fue alcanzado. Los metales fueron analizados por AAs.

2.3 Preparación de muestras para análisis espectrométricos

Una vez tomadas las muestras de forma aleatoria, el contenido del AM fue vaciado y eluido para el análisis de elementos traza (metales pesados) mediante la técnica de Espectrometría de Absorción Atómica (AAs).

Cada muestra de AM fue lavada con agua destilada para posteriormente proceder a expulsar el gel de poliacrilamida por uno de los extremos del tubo plástico. El contenido del tubo fue vaciado sobre un tamiz de plástico y enjuagado con suficiente agua destilada para garantizar que toda la resina saliera del mismo.

La resina fue filtrada y colectada sobre un vaso plástico de 100 ml de capacidad; una vez hecho esto, la resina fue trasvasada hacia un tubo plástico de 50 ml procurando que tuviera la menor cantidad de agua posible.

A cada tubo que contenía la resina, se le añadieron 30 ml de HNO₃, 6M y se almacenó por espacio de 24 horas para que se completara el proceso de digestión de la muestra. Una vez completado el período de digestión, se procedió a diluir las muestras y se guardaron en refrigeración (4 °C) hasta posterior análisis.

2.4 Análisis de muestras por Espectrometría de Absorción Atómica (AAs)

Cada muestra de la etapa de captación fue analizada utilizando un espectrómetro de absorción atómica, modelo Shimadzu A 7000.

El equipo cuenta con una fuente de luz que emite la línea espectral de un elemento (lámpara de cátodo hueco

o lámpara de descarga sin electrodos), un dispositivo para vaporizar la muestra (usualmente una llama), un medio para aislar una línea de absorción (monocromador o filtro y una abertura ajustable), y un detector fotoeléctrico el cual está asociado a un amplificador electrónico y un equipo de medida.

Un rayo de luz es dirigido a través de la llama a un monocromador y sobre un detector, que mide la cantidad de luz absorbida por el elemento atomizado en la llama.

3. Resultados

3.1 Experimento I

Estudio para investigar la captación de metales por parte del “molusco artificial” bajo diferentes concentraciones

En este estudio pudo observarse que a mayor concentración de sales y a mayor tiempo de exposición, la captación de metales por parte del AM es mayor.

También se observa que la afinidad del AM por los metales varía.

Los resultados de esta etapa son presentados a continuación.

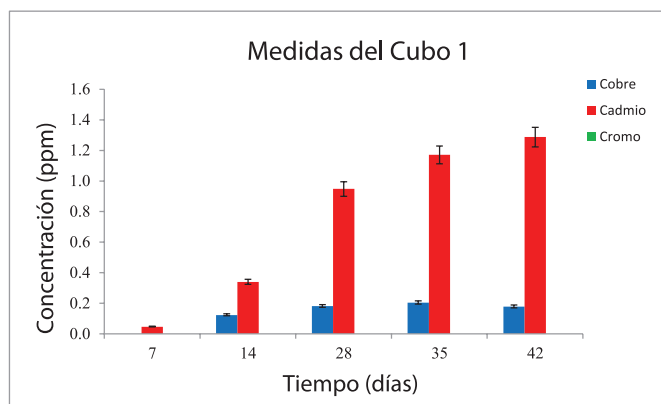


Figura 1. Captación de cobre, cadmio y cromo por parte de los AM en función del tiempo. Cubo 1 (T=25.3 °C, pH=6.04, salinidad=30 psu).

La figura 1 muestra la concentración de Cu, Cd, Cr, acumulada en el AM, expuesto a distintas concentraciones del metal durante un período de 42 días en el cubo 1. Puede observarse que la captación de cobre se va incrementando a medida que aumenta el tiempo de exposición, alcanzando su máxima captación en el día 42; en cuanto al cadmio, se mantienen muy próximas y en cuanto al cromo no hay medición.

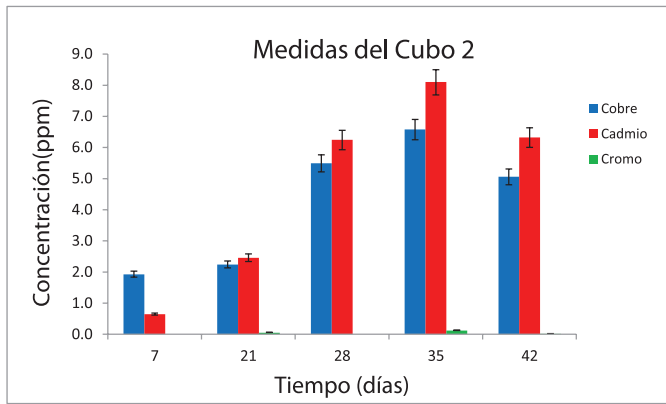


Figura 2. Captación de cobre, cadmio y cromo por parte de los AM en función del tiempo. Cubo 2 (T=25.4 °C, pH=6.55, salinidad=30 psu).

La figura 2 muestra la concentración de Cu, Cd, Cr, acumulada en el AM, expuesto a distintas concentraciones del metal durante un periodo de 42 días en el cubo 2. Puede observarse que la concentración de Cu acumulada en el AM durante el monitoreo alcanzó su máximo en el día 35 y luego disminuye. El Cd acumulado alcanza su máximo el día 35 y luego disminuye en el día 42. La captación de Cr no hay valores.

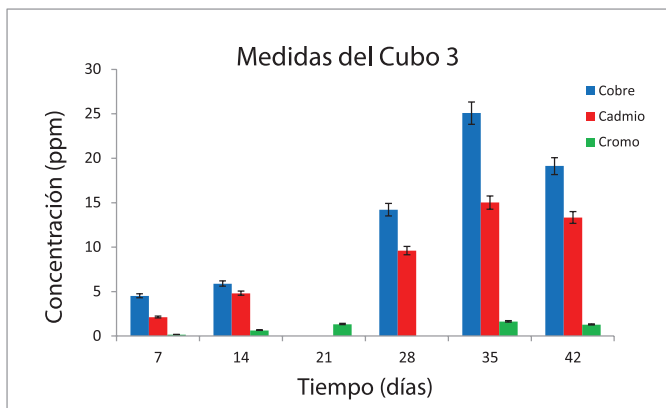


Figura 3. Captación de cobre, cadmio y cromo por parte de los AM en función del tiempo. Cubo 3 (T=25.2 °C, pH=5.54, salinidad=40 psu).

La figura 3 muestra la concentración de Cu, Cd, Cr, acumulada en el AM, expuesto a distintas concentraciones del metal durante un periodo de 42 días en el cubo 3. Se observa que la concentración de Cu acumulada en el AM durante el monitoreo se incrementa y alcanzó su máximo en el día 35 y luego disminuye. La concentración de cadmio, se incrementa y alcanza su máximo el día 35 y

luego disminuye en el día 42. En la captación de Cr se observan valores muy bajos y próximos.

3.2 Experimento II

Estudio para evaluar el efecto a corto plazo de la variación en la concentración de metales sobre la acumulación de metales por los *Artificial mussels* (AM).

Los resultados para la evaluación del efecto a corto plazo en la variación de la concentración son presentados a continuación. Cubos 4a/4b y 5a/5b.

La figura 4 muestra la concentración de Cu, Cd, Cr, acumulada en el AM durante el monitoreo en los cubos 4a/4b. Puede apreciarse que la afinidad del AM es mayor hacia el Cu, seguida por el Cd, siendo el Cr el que presenta la menor afinidad de todos los metales en estudio. Ambos metales alcanzan su máxima captación el día 20; sin embargo, al ser evaluado el comportamiento del Cr, puede observarse que su máxima captación fue durante la primera semana de exposición en el tanque 4a, decreciendo su concentración a medida que se iba desarrollando el experimento.

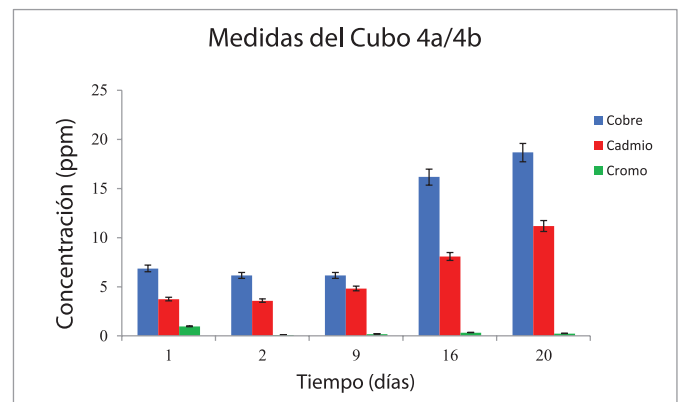


Figura 4. Captación de cobre, cadmio y cromo por parte de los AM en función del tiempo. Cubos 4a (T=25.1 °C, pH=6.42, salinidad=25 psu), 4b (T=25.2 °C, pH=5.37, salinidad=30 psu).

La figura 5 muestra la concentración de Cu, Cd, Cr, acumulada en el AM, expuesto a distintas concentraciones del metal durante un periodo de 23 días en los cubos 5a/5b. Puede observarse que la concentración de Cu acumulada en el AM durante el monitoreo va incrementándose en el tiempo y alcanzando su máximo nivel de captación en el día 20, para posteriormente disminuir hacia el día 23. En cuanto a la captación de Cd por parte del AM, puede apreciarse un aumento gradual de ésta a medida que transcurría el experimento, encontrándose también un

máximo en el día 20 y manteniendo esta concentración hasta el día 23. Por otro lado, de todos los elementos bajo estudio, el Cr fue el que se adhirió en menor proporción al AM, manteniendo sus niveles a bajas concentraciones y contantes a lo largo de los 23 días de experimentación.

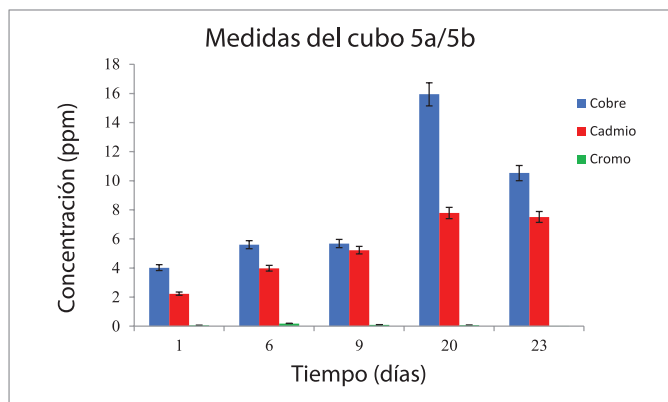


Figura 5. Captación de cobre, cadmio y cromo por parte de los AM en función del tiempo. Cubos 5a (T=25.2 °C, pH=6.33, salinidad=30 psu), 5b (T=25.2 °C, pH=5.44, salinidad=20 psu).

4. Discusión

Debido a la gran relevancia que tiene para Panamá el Humedal de Importancia Internacional Golfo de Montijo, inscrito en la red mundial de Humedales del Convenio RAMSAR en noviembre de 1990, y declarado área protegida en 1994 por la legislación panameña (ANAM, 2014), por la gran diversidad biológica que alberga; a pesar de esto, no escapa a la presión ejercida por la creciente explosión demográfica y el aumento de las necesidades básicas, que a su vez han llevado a un aumento en las actividades humanas realizadas para la supervivencia a su alrededor. Actividades antropogénicas como la agricultura, curtiembre y pesquerías (por el uso de combustibles fósiles) llevadas a cabo en las inmediaciones del Sitio RAMSAR-Golfo de Montijo, pueden aportar metales pesados al cuerpo de agua, ya sea de forma directa o indirecta a través de la escorrentía (Elkady, Sweet, Wade, & Klein, 2015).

Para poder determinar los criterios de conservación, protección y manejo de este humedal costero, al igual que de otros cuerpos de agua, se hace necesario conocer los principales agentes de impacto ambiental (Entre estos, los metales pesados) en este ecosistema, mediante el monitoreo periódico del área bajo observación, y la selección de matrices analíticas o dispositivos (*Artificial*

mussel) que permitan realizar un análisis confiable de la situación del sitio en cuestión. Para este efecto, en este estudio se seleccionó el uso del *Artificial mussel*, como dispositivo para el monitoreo de metales pesados; sin embargo, esta técnica de muestreo y análisis exigió una serie de pruebas de validación en el laboratorio, bajo condiciones controladas de pH, salinidad y temperatura, previas a su utilización en campo, las cuales serán expuestas en el presente trabajo.

Estudios similares de validación sobre *Artificial mussels* realizados por Wu et al., 2007, muestran un incremento en los niveles de Cd, Cu y Cr durante un periodo de exposición de 14 días; encontrándose un orden de afinidad $Cd > Cu > Cr$, independientemente de la salinidad y temperatura. Al observarse las figuras 1 y 2, se aprecia la misma afinidad por parte del AM reportada por Wu et al., 2007. Sin embargo, los resultados obtenidos, muestran que a mayor tiempo de exposición y a mayor salinidad la afinidad por los metales varía, encontrándose que el AM presenta una mayor afinidad por el Cu que por el Cd. La figura 3, muestra que a una salinidad de 40 psu la mayor afinidad es por el cobre, apreciándose su máxima unión a los 35 días de exposición. A este nivel de salinidad, se observa por primera vez la presencia de Cr, según los hallazgos de Wu et al., 2007, la captura tanto de Cr como de Cu es afectada significativamente por este parámetro.

Al comparar las figuras 1, 2 y 3, se observa que la afinidad del AM por ciertos metales, cambia al aumentar la salinidad. La captación de estos metales se hace más eficiente a los 35 días de exposición y al cambiar la salinidad la mayor afinidad del dispositivo es hacia el Cu.

El AM, brinda información complementaria sobre la disponibilidad de los metales disueltos en el medio acuático (Degger et al., 2011), ya que su componente principal la resina Chelex® 100 (Resina de intercambio catiónico), empleada para su fabricación, actúa como grupo quelante en la unión de iones metálicos polivalentes (Herrin et al., 2001), alcanzando su equilibrio entre 30-40 días de exposición al medio. Puede decirse además, que los resultados aquí expuestos (Los cuales van en un rango de 35 a 42 días) guardan relación en cierta manera con estudios realizados previamente.

La figura 4 muestra la evaluación de la variación de la concentración de los metales (captación) a corto plazo, en los cubos 4a/4b. Se aprecia una creciente captación

de Cu, seguida de Cd a partir del día 9, encontrándose un máximo para el día 20 para ambos metales, y con diferencias en concentración entre estos. No hubo diferencias estadísticamente significativas, en cuanto a la captación de Cu, durante los días 1, 2 y 9, y para el Cd los días 1 y 2. En cuanto al Cr, el nivel de captación se mantuvo bajo, disminuyendo levemente del día 1 al 2 y manteniéndose constante hasta el día 20.

De acuerdo con los fabricantes (Bio-Rad, 1994) el orden de selectividad de la resina Chelex® 100 (componente importante del AM) para cationes en soluciones de nitrato o de cloruro es aproximadamente el siguiente $\text{Cu}^{+2} \gg \text{Pd}^{+2} > \text{Cr}^{+3} > \text{Zn}^{+2} > \text{Cd}^{+2}$; no obstante, los resultados obtenidos demuestran una mayor afinidad hacia el Cu, seguido de Cd y finalmente hacia el Cr, discrepando ligeramente de los reportados por Bio-Rad. Se pudo comprobar que el AM tiene una fuerte afinidad hacia el Cu y no hacia el Cd, como aparece reportado en la literatura.

En la figura 5 (Cubos 5a/5b) se observa un comportamiento bastante parecido a los hallados en los cubos 4a/4b, presentándose la máxima captación para el Cu el día 20 de exposición, para luego descender el día 23. El Cd presenta un incremento a partir del día 6 de exposición a este metal, siendo su punto máximo de captación el día 20 y permaneciendo sin mayores cambios hasta el día 23 del experimento.

Comparando los experimentos llevados a cabo durante la exposición a los metales por parte del AM, en los cubos 4a/4b y 5a/5b, podría decirse que, éste presenta su máximo punto de captación para los metales Cu y Cd el día 20 para ambos ensayos, con concentraciones notoriamente más bajas de Cr. El AM es capaz de captar estos metales de una forma rápida y eficiente aún en salinidades de 20-30 psu.

5. Conclusiones

Del presente trabajo puede concluirse:

- Los estudios de validación realizados indican que los AM pueden ser implementados como herramienta complementaria en los estudios de contaminación por metales pesados en ambientes acuáticos, debido a que son unos dispositivos para el monitoreo de metales *in situ* de bajo costo, que permiten la reproducibilidad de los datos.
- El AM presentó una unión más fuerte hacia Cd que a los otros dos metales a salinidades de 30 psu. Sin embargo,

a una salinidad de 40 psu, el comportamiento varía y la afinidad es mayor hacia el Cu.

- Para la mayor parte de los metales estudiados, los AMs presentaron un punto máximo de captación a los 35 días de exposición.
- Es importante destacar que, la captura del metal durante el estudio para investigar la captación de metales por parte del AM bajo diferentes concentraciones, se presentó el siguiente orden de selectividad: $\text{Cd}^{+2} \gg \text{Cu}^{+2}$ a salinidades bajas y $\text{Cu}^{+2} \gg \text{Cd}^{+2}$ a mayor salinidad. Encontrándose Cr^{+3} solamente en el cubo 3, el cual tenía mayores concentraciones de metales.
- Durante el estudio para evaluar el efecto a corto plazo de la variación en la concentración de metales sobre la acumulación de metales por los AM, las concentraciones en los AM expuestos en los tanques 4a y 4b, 5a y 5b presentaron el siguiente orden de selectividad: $\text{Cu}^{+2} \gg \text{Cd}^{+2} \gg \text{Cr}^{+3}$, encontrándose además un máximo de captación el día 20.

6. Recomendaciones

Con base en las experiencias obtenidas y la información bibliográfica compilada, recomendamos el uso del dispositivo AM para el monitoreo de metales pesados en ambientes acuáticos, en un periodo no menor de los 35 días de exposición, ya que, es en este momento que el dispositivo alcanza su nivel máximo de captación.

En cuanto a estudios de corto plazo que se tengan a bien realizar, es recomendable monitorear en un período no menor a los 20 días de exposición.

7. Agradecimientos

Agradecemos al Dr. Cecilio Hernández, Jefe del Laboratorio de Análisis Industrial y Ciencias Ambientales (LABAICA) del Centro Experimental de Ingeniería (CEI), de la Universidad Tecnológica de Panamá, así como a su personal técnico y científico, por todo el apoyo brindado para la realización del presente estudio.

8. Referencias

- [1] A. Tayeb, M. R. Chellali, A. Hamore and S. Debbah, "Impact of urban and industrial effluents on coastal marine environment in Oran, Algeria", *Marine Pollution Bulletin*, Article in Press, 2015.
- [2] R. S. S. Wu and T. C. Lau, "Polymer-ligands: a novel chemical devise for monitoring heavy metals in the aquatic environment", *Marine Pollution Bulletin*, vol32, pp. 391-396, May. 1996.

- [3] N. Degger, V. Wepener, B. J. Richardson and R. S. S. Wu, "Application of artificial mussel (AMs) under South African marine conditions: A validation study", *Marine Pollution Bulletin*, vol63, pp. 108-118, 2011.
- [4] ANAM, "Humedal de Importancia Internacional Golfo de Montijo", [En línea], <http://www.anam.gob.pa/index.php/content-component/parque-internacional-la-amistad/89-parques-nacionales/256-humedal-de-importancia-internacional-golfo-de-montijo> [Consulta: 21 abril 2014].
- [5] A. El Kady, S. T. Sweet, T. L. Wade, A. G. Kleen, "Distribution and assessment of heavy metal in the aquatic environment of Lable Manzala, Egypt", *Ecological Indicators*, vol58, pp 445-457, Nov. 2015.
- [6] R. S. S. Wu, T. C. Lau, W. K. M. Fung, P. H. Ko, K. M. Y. Leung, An 'artificial mussel' for monitoring heavy metals in marine environment. *Environmental Pollution Bulletin*, vol145:1, pp. 104-110, 2007.
- [7] Bio-Rad, "Guide to Ion Exchange. BioRad, Hercules, CA. 1994.
- [8] R. T. Herrin, A. W. Andren, D. E. Armstrong, "Determination of silver speciation in natural waters. I. Laboratory tests of Chelex-100 chelating resin as competing ligand", *Environmental Science and Technology*, vol 35, pp. 1953-1958, 2001.