

## **DESIGN OF A CONTINUOUS SYSTEM OF ADSORPTION TO REMOVE HEAVY METALS FROM WATER. APPLICATION TO DEVELOPING COUNTRIES**

García-Fayos, Beatriz; Arnal Arnal, José Miguel; Piris López, Javier;  
Lucas-Granados, Bianca; Sancho Fernández, María

Universitat Politècnica València

Water pollution by heavy metals is a world problem that gives as a result the scarcity of drinking water, especially in developing countries. There are many techniques to remove heavy metals, such as biosorption. Biosorption is a process that uses low cost biomaterials which can hold heavy metals and thus remove them from water. The present work proposes the design of a continuous adsorption system to remove heavy metals from water. The object is to design and build a column system that is going to work in continuous conditions, therefore, the number of columns, flow rate, efficiency of the process and the biosorbent regeneration will be determined also. The biosorbent proposed is *Moringa oleifera* shell (a tree from Africa and India which has so many applications, among others, water coagulation properties), because previous batch experiments shows its good adsorption efficiency rate. The designed system will be proposed as a low cost system to be used in developing countries, primarily in small rural areas where people has not any access to drinking water.

**Keywords:** *Moringa oleifera; Heavy metals; Biosorption; Drinking water*

## **DISEÑO DE UN SISTEMA DE ADSORCIÓN EN CONTINUO PARA ELIMINAR METALES PESADOS DEL AGUA. APLICACIÓN EN PAÍSES EN DESARROLLO**

La contaminación del agua por metales pesados es un problema mundial que deriva, junto a otros, en la escasez de agua potable. Existen varias técnicas para eliminar metales pesados del agua, entre ellas la bioadsorción. La bioadsorción es un proceso que consiste en utilizar biomateriales de bajo coste que retengan el metal y lo eliminen así del agua. El presente trabajo propone en el diseño de un sistema de adsorción en continuo para el tratamiento de aguas contaminadas con metales. Se diseñará y construirá un sistema de columnas que operará en continuo, determinando el número de columnas necesarias, el caudal a tratar, la eficiencia del proceso y la regeneración del bioadsorbente. El bioadsorbente utilizado será la cáscara de *Moringa oleifera*, un árbol procedente de África y La india cuyas semillas se utilizan como coagulante en el ciclo de potabilización del agua. Uno de los residuos generados en dicho proceso es la cáscara de *Moringa*, de la cual se ha comprobado su efectividad como adsorbente mediante ensayos en discontinuo. El sistema diseñado tiene como fin su aplicación en pequeñas áreas, sobretodo en zonas rurales donde no existe acceso a agua potable, para mejorar así su calidad de vida.

**Palabras clave:** *Moringa oleifera; Metales pesados; Bioadsorción; Agua potable*

## 1. Introducción

El agua es un recurso indispensable sin el cual no habría vida. Todo ser humano necesita tener unas condiciones básicas de agua potable y saneamiento para garantizar su calidad de vida.

La escasez de agua a nivel mundial junto con su creciente contaminación es un problema global importante que afecta a todos, pero especialmente a aquellas zonas con menos recursos. El agua no segura y el escaso saneamiento son la causa de aproximadamente el 88% de todas las enfermedades del mundo en desarrollo (ECODES, 2010).

El agua es particularmente vulnerable a la contaminación por vertidos de residuos de varias industrias, de los cuales los metales pesados son los componentes más importantes. A diferencia de las sustancias tóxicas orgánicas, que pueden ser degradadas, las sustancias inorgánicas como los metales no pueden ser degradados y permanecen de forma indefinida en el medio ambiente. Su carácter no biodegradable y su larga vida media biológica hace que los metales se acumulen y que los seres humanos estén expuestos a ellos a través del agua y la comida (Villaescusa et al., 2004).

Las soluciones para aliviar la crisis del agua en los países en desarrollo tienen que estar orientadas hacia el desarrollo de tecnologías innovadoras, eficaces, sostenibles, de bajo coste y socialmente aceptadas, que permitan mejorar la situación sanitaria y condiciones de vida (Mintz et al., 2001 y Mara, 2003).

Los métodos convencionales para la eliminación de metales pesados del agua incluyen la precipitación química, coagulación, extracción con disolventes, electrólisis, separación por membranas, intercambio iónico y adsorción (Calero et al., 2009). Las nuevas investigaciones se centran en la búsqueda de métodos de tratamiento alternativos.

La bioadsorción se ha propuesto como un método alternativo debido a su carácter respetuoso con el medio ambiente, su excelente rendimiento y su bajo coste (Volesky, 1990 y Zinkus et al., 1998). La bioadsorción utiliza biomateriales baratos para secuestrar de manera pasiva y efectiva sustancias orgánicas e inorgánicas de disoluciones acuosas, y los biomateriales utilizados en este proceso se denominan bioadsorbentes (Harikishore Kumar Reddy et al, 2011 y Volesky, 2007).

El bioadsorbente utilizado para este estudio de eliminación de metales pesados del agua, es la cáscara de *Moringa oleifera*. La *Moringa oleifera* (MO) es un árbol tropical originario de África y la India que posee múltiples propiedades nutricionales y farmacológicas. Su aplicación en el campo del tratamiento del agua es ampliamente conocida, puesto que las semillas poseen un compuesto activo coagulante capaz de reducir la turbidez del agua y la contaminación microbiológica de la misma (García-Fayos, 2009).

Para el uso de las semillas como coagulante natural es necesario un proceso previo de extracción de aceite. Uno de los residuos generados durante este proceso es la cáscara de *Moringa oleifera*. Con el fin de valorizar la cáscara generada y producir así la menor cantidad de residuos posibles para garantizar la sostenibilidad del medio ambiente, se propone su uso como bioadsorbente de metales pesados.

Existen trabajos previos que estudian el potencial de la *Moringa oleifera* en la eliminación de metales pesados (tales como cromo, cobre, cadmio, zinc, etc.) utilizando distintos sustratos obtenidos a partir de *Moringa* como bioadsorbente. Entre los más utilizados se encuentran las semillas crudas trituradas (Sharma et al., 2007), carbón activo obtenido a partir de madera de *Moringa* (Kalavathy & Miranda, 2010) o la corteza de la misma (Harikishore Kumar Reddy et al., 2011) con resultados variables. En este trabajo se propone como novedad el uso de la cáscara cruda de *Moringa oleifera* como bioadsorbente, partiendo de los resultados obtenidos en el estudio de la efectividad de la cáscara de *Moringa oleifera*

como bioadsorbente en la eliminación de metales pesados del agua, que ha sido probada anteriormente mediante ensayos en discontinuo (Piris, 2013).

Sin embargo, el funcionamiento, desde un punto de vista práctico, de los procesos de bioadsorción a escala real, conviene realizarlo a menudo en columnas de lecho fijo para tratar un caudal de agua de forma continua (Chu, 2004). Así pues, este estudio propone el diseño de un sistema de adsorción en continuo para el tratamiento de agua contaminada con metales pesados. De forma que se determinará el número de columnas necesarias y la eficiencia del proceso. Además, se definirá el procedimiento para realizar la regeneración del bioadsorbente utilizado.

## 2. Objetivo

El objetivo de este trabajo es el diseño de un sistema de adsorción en continuo para eliminar metales pesados del agua, con el fin de ser aplicado en pequeñas áreas, sobretudo rurales, de países en vías de desarrollo.

Para lograr este objetivo, se propone un diseño eficaz y de sencilla implantación que utilice materiales económicos y cuyo bioadsorbente es la cascara de la semilla obtenida del árbol de *Moringa oleifera*, que no incrementa demasiado el coste del proceso. Se busca con esto mejorar la calidad del agua potable y, por tanto, las condiciones de vida de aquellos países con menos recursos que no disponen de condiciones básicas de agua potable y saneamiento.

## 3. Metodología experimental

El desarrollo experimental de este trabajo se encuentra englobado en un proyecto de investigación sobre la aplicación de coagulantes y floculantes naturales para la potabilización de agua en países en vías de desarrollo, financiado por la Universitat Politècnica de València.

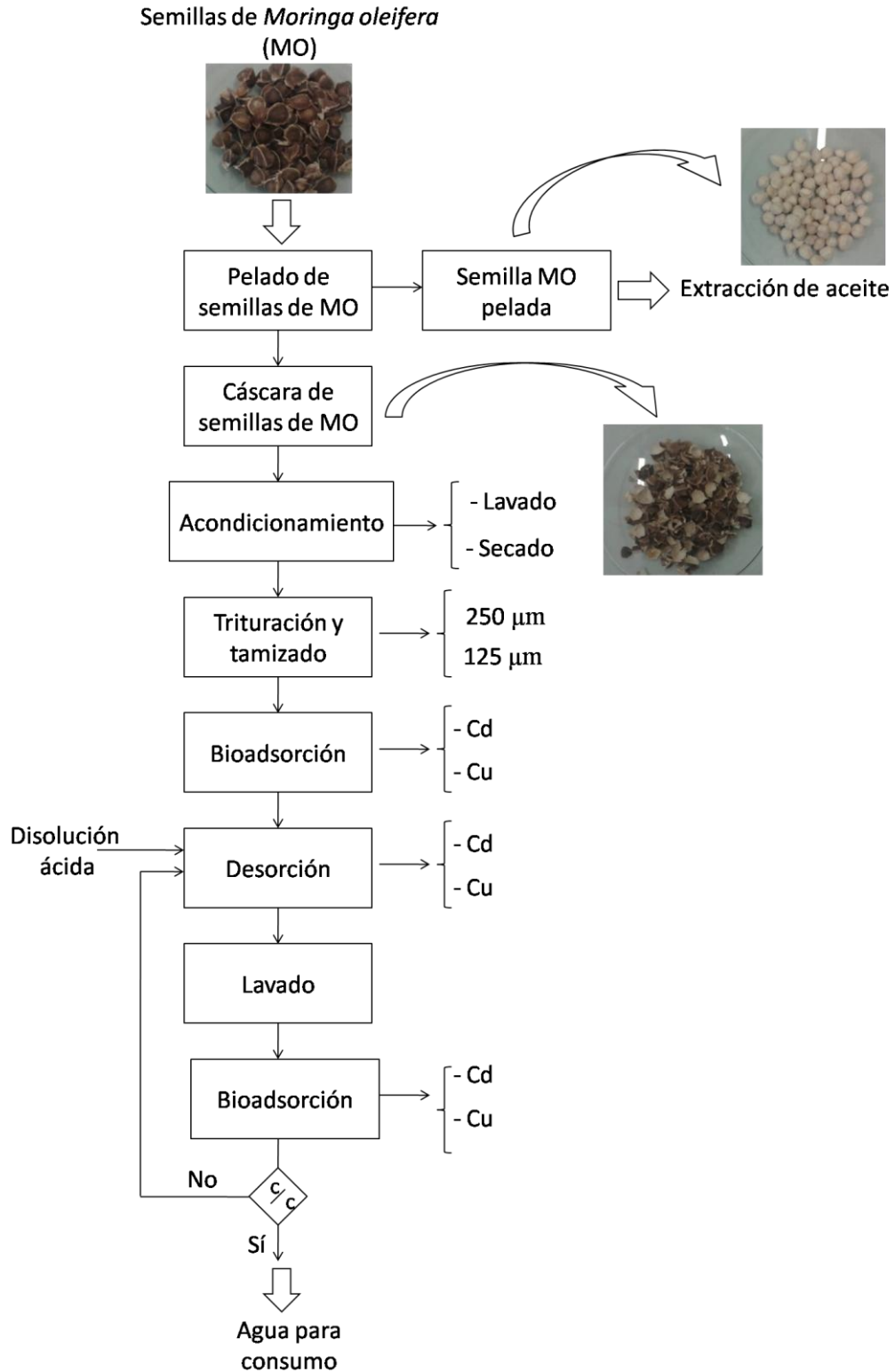
Para poder llevar a cabo el diseño del sistema de bioadsorción en continuo, se realizan previamente ensayos en discontinuo a escala de laboratorio con el fin de obtener datos sobre el rendimiento de bioadsorción y de desorción del proceso, dichos parámetros son los utilizados en el diseño indicado. Los metales estudiados han sido cadmio y cobre.

Las etapas o fases de que consta el método desarrollado para la obtención del bioadsorbente, se muestran en la Figura 1, que con más detalle se describen a continuación.

### 3.1. Acondicionamiento del bioadsorbente

El bioadsorbente utilizado en este estudio es la cáscara de *Moringa oleifera* (residuo generado durante el proceso de extracción del aceite de las semillas). Tras la recepción de la cáscara, ésta se somete a un proceso de lavado que consiste en colocar 10 gramos de cáscara en contacto con 400 mL de agua destilada hirviendo. Se dejan en ebullición durante 10 minutos. Transcurrido el tiempo, se filtra la cáscara y se vuelve a colocar en contacto con agua destilada hirviendo, repitiendo el mismo proceso hasta un total de 10 ciclos de lavado. Este lavado se realiza con el fin de eliminar los compuestos orgánicos solubles presentes en la cáscara, que interferirían en la calidad del agua tratada, disminuyendo así la carga orgánica de la misma. Una vez realizados los diez lavados, la cáscara se seca en estufa a 60°C durante 24 horas.

Figura 1. Diagrama de bloques del método de eliminación de metales pesados mediante bioadsorción empleando cáscara de *Moringa oleifera*



### **3.2. Trituración y tamizado**

A continuación, la cáscara seca se tritura en el molino eléctrico y se tamiza en la tamizadora a un tamaño de luz de malla de 250 micras, obteniendo el tamaño de partícula comprendido entre 125 y 250 micras. El material así preparado, será el adsorbente utilizado en el proceso de bioadsorción.

### **3.3. Ensayos de bioadsorción**

Los ensayos de bioadsorción en discontinuo se realizan con el fin de obtener las condiciones óptimas del proceso: tiempo de contacto, pH, temperatura, concentración inicial de metal pesado y dosis añadida de bioadsorbente. Los rangos estudiados para cada una de ellas se muestran a continuación (Piris, 2013).

- Tiempo de contacto: entre 20 minutos y 24 horas
- pH: entre 2 y 8 unidades de pH
- Temperatura: entre 3 y 30 °C
- Concentración inicial de metal pesado: entre 1 y 40 mg/L
- Dosis de bioadsorbente añadida: entre 0,05 y 1 gramo

Los rangos de las variables estudiadas se han establecido tomando como referencia ciertas fuentes bibliográficas de estudios anteriores de bioadsorción con diferentes bioadsorbentes (Kalavathy & Miranda, 2010 y Mataka et al., 2010).

### **3.4. Ensayos de desorción**

Para que el sistema de tratamiento sea eficaz, es necesario establecer un procedimiento de regeneración del bioadsorbente y recuperación del metal, para poder realizar varios ciclos de adsorción-desorción y optimizar así el proceso. Como ha sido indicado, el objetivo de los ensayos de desorción es determinar las condiciones más adecuadas para la máxima regeneración del bioadsorbente, es decir, determinar el ácido empleado, la concentración óptima, el volumen de disolución ácida y el tiempo de desorción necesario para conseguir una eliminación de metal aceptable, de forma que el bioadsorbente pueda volver a ser usado en un nuevo ciclo de bioadsorción.

En la actualidad se están estudiando diferentes disoluciones ácidas para obtener los resultados óptimos de desorción y el protocolo adecuado de regeneración del bioadsorbente.

### **3.5. Lavado del bioadsorbente**

Tras los ensayos de desorción, el bioadsorbente se encuentra con un pH ácido, por tanto es necesario realizar un lavado con agua destilada hasta conseguir que el sistema se encuentre a pH aproximadamente neutro y así volverlo a utilizar.

### **3.6. Ensayos de bioadsorción tras desorción**

El bioadsorbente tras su regeneración vuelve a ser empleado en un nuevo ciclo de bioadsorción siguiendo el mismo procedimiento que en el primer ciclo.

Tras finalizar este nuevo ciclo de bioadsorción, se realiza un control de calidad consistente en medir la concentración de metal presente en el agua mediante absorción atómica de llama para comprobar que el nuevo ciclo de bioadsorción tras la desorción ha sido efectivo, es decir, que el bioadsorbente continúa siendo útil para el proceso. En caso contrario, se

debe someter el bioadsorbente a un nuevo ciclo de desorción para conseguir eliminar el metal adsorbido.

De acuerdo con los resultados obtenidos del desarrollo experimental indicado, se obtienen los datos necesarios para realizar el diseño de la instalación en continuo.

## 4. Resultados

### 4.1 Ensayos de bioadsorción

Tras los ensayos en discontinuo se establecen las condiciones óptimas del proceso de bioadsorción llegando a obtener rendimientos superiores al 85%. Las condiciones establecidas son las siguientes (Piris, 2013):

- Tiempo de contacto: 1 hora
- pH: 6 unidades de pH
- Temperatura: 20 °C
- Concentración inicial de metal pesado: 1 mg/L
- Dosis de bioadsorbente añadida: 1 gramo

Estos resultados han sido muy satisfactorios en comparación con investigaciones similares. Así por ejemplo, en estudios realizados con carbón activo a partir de madera de *Moringa oleifera* se han establecido como condiciones óptimas las siguientes: 4 horas de tiempo de contacto, pH 6 unidades y temperatura de 50 °C para el cobre (Kalavathy et al., 2010). Y en estudios realizados con semillas crudas trituradas de *Moringa oleifera* se ha alcanzado un rendimiento del 85% para cadmio con 4 mg de bioadsorbente en 200 mL de disolución de metal (25 ppm) durante 40 minutos (Sharma et al., 2007).

Por lo tanto, a pesar de emplear diferentes partes de *Moringa oleifera* como bioadsorbente y no tener exactamente las mismas condiciones de ensayo, se observa que el rendimiento obtenido con cáscara de *Moringa oleifera* es similar al obtenido con las semillas crudas trituradas. Además, las condiciones óptimas establecidas para la cáscara consiguen que el máximo rendimiento se alcance a temperatura ambiente, y que el tiempo de contacto sea menor que en el caso del carbón a partir de madera de *Moringa*, lo que hace que el proceso sea en principio más rentable económicamente. Por tanto, tras comparar resultados con otras investigaciones, se puede establecer que la cáscara de *Moringa oleifera* es un bioadsorbente eficaz que consigue elevados rendimientos de eliminación de metales pesados en agua.

### 4.2. Ensayos de desorción

En la actualidad, se están realizando estudios de desorción empleando disoluciones ácidas a diferente concentración. Se está obteniendo un rendimiento de desorción superior al 75% para los metales estudiados.

### 4.3. Descripción del sistema de bioadsorción en continuo

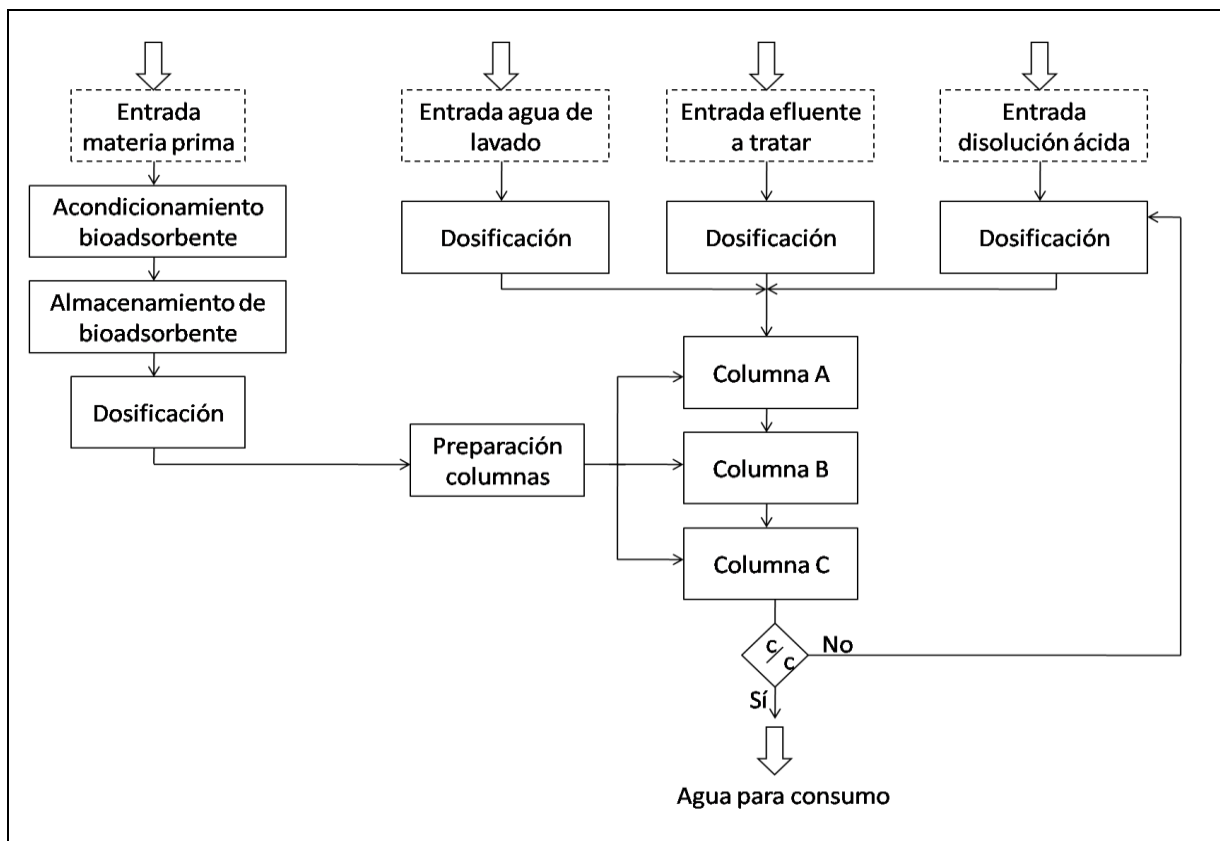
Tras realizar los ensayos pertinentes, se establece el diagrama de bloques del sistema en continuo para el tratamiento de agua contaminada con metales pesados. Las etapas de las que consta el método son las mismas que se han realizado en los ensayos en discontinuo pero integradas en el ciclo continuo. La Figura 2 muestra el diagrama de bloques del proceso en continuo.

Tras la recepción de la materia prima (semillas de *Moringa oleifera*) se procede al acondicionamiento del bioadsorbente, trituración y tamizado. El acondicionamiento se basa en las etapas de lavado y secado. La trituración y tamizado de la cáscara se realiza hasta obtener el tamaño deseado entre 125 y 250 micras. A continuación, se preparan las columnas y se introduce el bioadsorbente en su interior.

Una vez el sistema está preparado, el efluente contaminado va pasando por el interior de las columnas para que el metal pesado se quede adsorbido y así el agua salga descontaminada de forma continua. A la salida de las columnas hay colocado un control de calidad para comprobar que la concentración de metal del agua de salida no sobrepasa el máximo permitido en agua potable (0,005 mg/L para cadmio y 1,3 mg/L para cobre (USEPA)). En caso contrario, significa que el bioadsorbente se ha agotado y se ha de proceder a su regeneración.

Para realizar la regeneración de las columnas, se hace pasar a través de la columna agotada la disolución ácida para que elimine los metales atrapados por el bioadsorbente y lo deje preparado para otro nuevo ciclo de bioadsorción. Una vez se ha desorbido el metal, se enjuaga la columna con agua, controlando el pH hasta que no existan restos de disolución ácida, y la columna queda preparada de nuevo.

**Figura 2. Diagrama de bloques del sistema de tratamiento en continuo para la eliminación de metales pesados del agua**



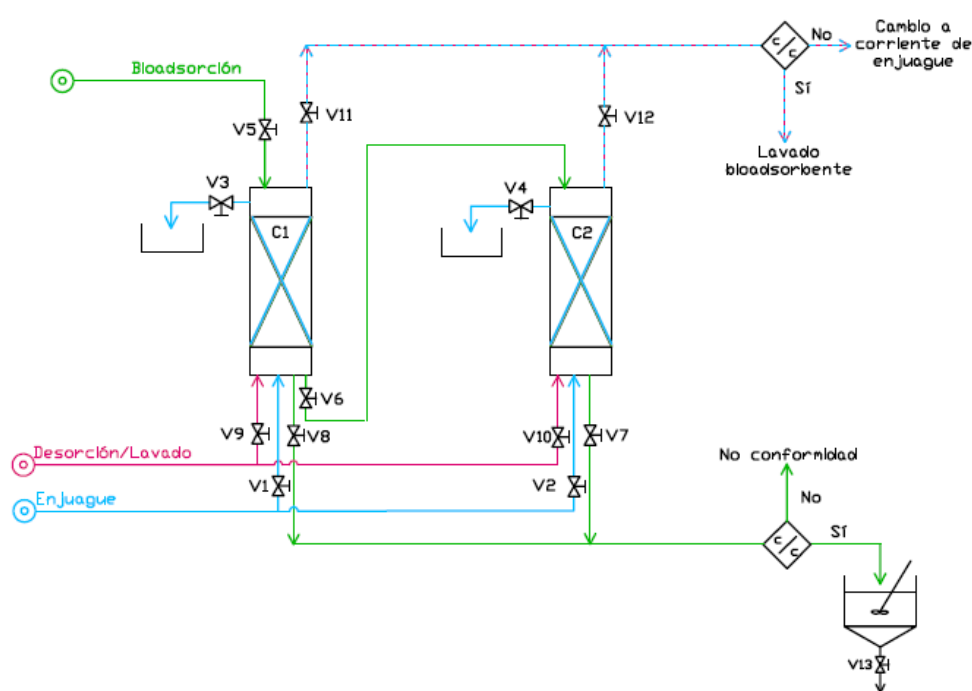
#### 4.4. Diseño del sistema de bioadsorción en continuo

El sistema completo consta de tres columnas de adsorción. Sin embargo, funciona operando al mismo tiempo con dos de las columnas, mientras que la tercera de ellas se pone en marcha cuando comienza a agotarse una de las columnas en operación y se tiene que proceder a su regeneración. De este modo se consigue que el sistema opere en continuo.

En la Figura 3 se muestra una parte del sistema de bioadsorción en continuo donde aparecen dos de las columnas funcionando.

El efluente contaminado entra a la primera columna C1 por la parte superior para comenzar el proceso de bioadsorción. Una vez atraviesa toda la columna, entra por la parte superior de la columna C2 para continuar con el proceso y reducir la concentración de metal por debajo del límite permitido. El efluente descontaminado sale por la parte inferior de la columna C2 y se somete a un control de calidad. Este control de calidad mide la concentración de metal pesado en el efluente para observar que la concentración de salida indica que el sistema trabaja en la condición de funcionamiento, es decir, que alcanza el grado de eliminación de metal pesado deseado.

**Figura 3. Columnas de bioadsorción en continuo**



El sistema sigue funcionando del mismo modo hasta que se detecta que la concentración de salida por la columna supera el valor máximo permitido (0,005 mg/L para el cadmio y 1,3 mg/L para el cobre, valores de concentraciones máximas aceptables en agua potable según datos de USEPA) y se encuentra en la condición de no conformidad. En ese momento, la columna C1 deja de funcionar y comienza su regeneración, mientras que el efluente contaminado sigue tratándose con las otras dos columnas del sistema (C2 y C3).

La regeneración de la columna C1 se realiza a contracorriente, de modo que la disolución ácida entra a la columna por la parte inferior y sale por la parte superior pasando a un control de calidad. Este control de calidad mide la concentración de metal indicando que la desorción se está efectuando de forma efectiva, y una vez se detecte que ya se ha desorbido el metal, finaliza la desorción y se pasa a la etapa de enjuague de la columna para eliminar los restos ácidos.

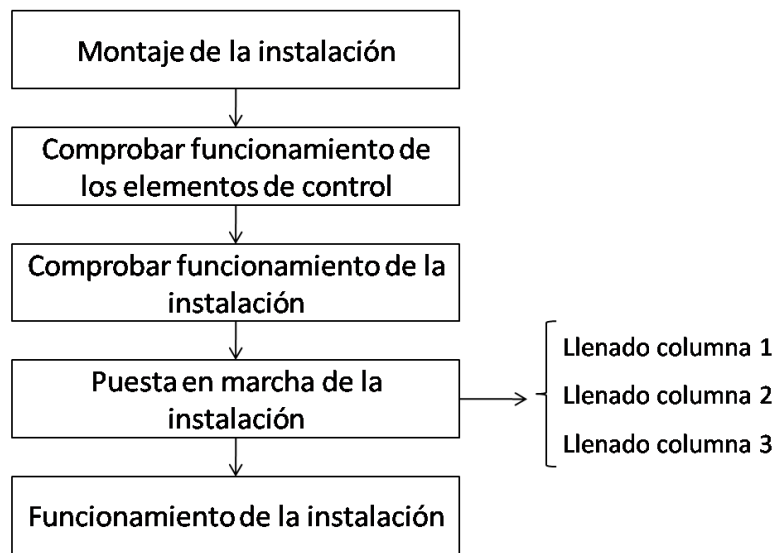
En la etapa de enjuague, el agua también entra a la columna por la parte inferior y sale por la parte superior, donde existe un control de calidad que mide el pH hasta comprobar que es



aproximadamente neutro y la columna vuelve a estar preparada para comenzar un nuevo ciclo de bioadsorción.

La secuencia de etapas que se ha de seguir para la puesta en funcionamiento de la instalación de bioadsorción en continuo se muestra en la Figura 4.

**Figura 4. Diagrama de bloques de la puesta en funcionamiento de la instalación de bioadsorción en continuo para eliminar metales pesados en agua**



Tras el montaje de la instalación, se ha de comprobar que todos los elementos de control (válvulas, bombas, manómetros, sondas de temperatura, etc.) funcionan correctamente. Una vez comprobado, se verifica el correcto funcionamiento de la instalación completa, y así ya se puede proceder a la puesta en marcha de la instalación y a su funcionamiento en continuo.

La Figura 5 muestra el diseño del sistema completo de bioadsorción en continuo, donde aparece el diagrama de flujo en la parte superior y su cuadro de funcionamiento en la parte inferior.

La primera etapa es la de puesta en marcha de la instalación, que se inicia con el llenado de las columnas introduciendo agua por la parte inferior, hasta que rebosa por la parte superior. De esta forma, se desplaza el aire ocluido en el lecho adsorbente y se evita la formación de caminos preferentes, lo que supondría un menor rendimiento del proceso. El agua que rebosa se recoge por la parte superior de la columna en un depósito.

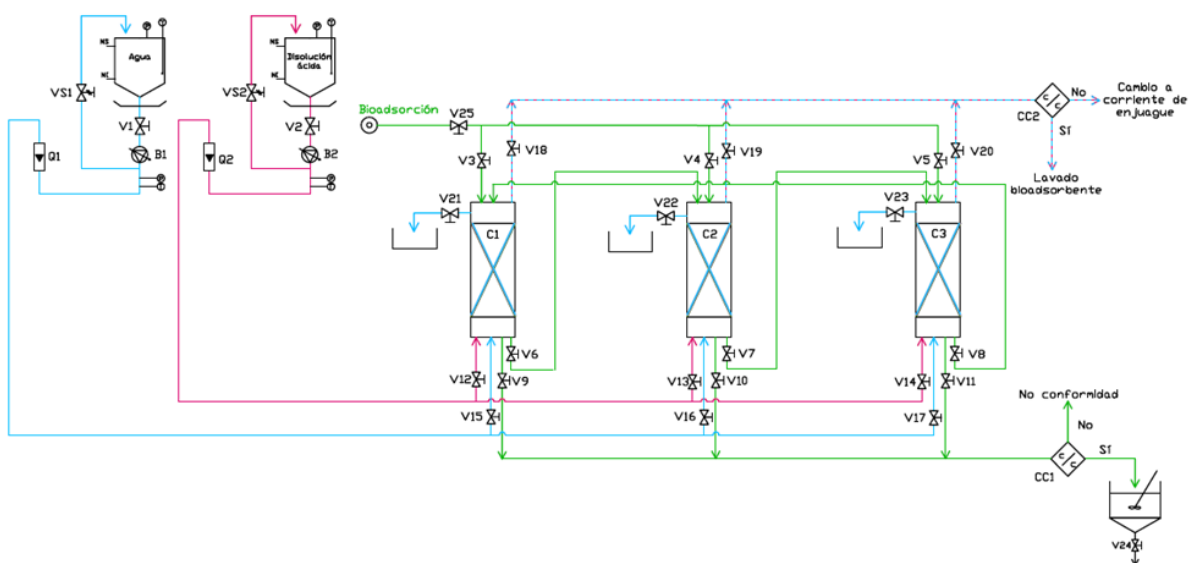
Una vez las columnas están llenas y listas para comenzar a funcionar, se procede a la etapa de bioadsorción propiamente dicha. Como se ha comentado anteriormente, las columnas funcionan por pares durante el proceso, de forma que el efluente atraviesa dos de las columnas y se somete a un control de calidad. El control de calidad detecta si el sistema está en condición de funcionamiento (es decir, el límite de metal no sobrepasa el establecido para agua potable) o, por el contrario, comienza a superar el límite y se ha de proceder a la regeneración de las columnas.

Cuando una columna se agota, se procede a la desorción a contracorriente y al enjuague de la columna tal como se ha explicado anteriormente, mientras que el efluente se trata con las otras dos columnas del sistema. De esta forma, la secuencia de trabajo de las columnas del

sistema es: C1 y C2; C2 y C3 (mientras C1 se regenera); C3 y C1 (mientras C2 se regenera); C1 y C2 (mientras C3 se regenera); y así sucesivamente.

El sistema funciona en continuo, pero en caso de que se deba realizar una parada prolongada en la instalación, el procedimiento a seguir es el siguiente: se dejarán las columnas desorbidas y enjuagadas totalmente listas para un nuevo ciclo de bioadsorción. Una vez enjuagadas, comenzarán a llenarse por la parte inferior con agua hasta que el agua comience a rebotar por la parte superior de las columnas (a través de las válvulas V22, V23 y V24) indicando que la columna está completamente llena de agua. En ese momento se cierran las válvulas de la instalación y se queda el sistema parado hasta nueva puesta en marcha de la instalación.

**Figura 5. Diseño del sistema de bioadsorción en continuo para eliminar metales pesados en agua. Diagrama de flujo y cuadro de funcionamiento**



ELEMENTOS	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20	V21	V22	V23	V24	V25	B1	B2	Q1	Q2	CC1	CC2	
<b>1. Puesta en marcha</b>																																
Columna 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	R	0	0	0
Columna 2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	R	0	0	0	
Columna 3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	R	0	0	
<b>2. Funcionamiento columnas adsorción</b>																																
Columnas 1-2	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	
Columnas 2-3	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
Columnas 3-1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
<b>3. Desorción columnas</b>																																
Columna 1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	R	0	1	
Columna 2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	R	0	1	
Columna 3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	R	0	1	
<b>4. Enjuague columnas</b>																																
Columna 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	R	0	0	1	
Columna 2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	R	0	0	1	
Columna 3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	R	0	0	1	
<b>5. Parada prolongada</b>																																
Columna 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

**0: elemento cerrado      1: elemento abierto      R: elemento en regulación**

Actualmente, se está trabajando en optimizar las condiciones de desorción de los metales pesados de la cáscara de *Moringa oleifera*. Tras optimizar dicha etapa y validar el método

global, se han de realizar ensayos en continuo a escala de laboratorio para comprobar que los rendimientos obtenidos son similares a los de los ensayos en discontinuo. Una vez comprobado esto, se deberán realizar los ensayos correspondientes en una planta piloto, y paralelamente realizar una valoración económica que muestre que el proceso es rentable y se puede implementar. Finalmente se procedería a la implementación del diseño realizado y a su puesta en marcha tal como se ha indicado en el presente trabajo.

Cabe señalar que la *Moringa oleifera* es un árbol tropical originario de África y la India, que abunda en dichas zonas, donde precisamente existen muchos problemas de falta de agua de calidad. Por este motivo, el diseño de este sistema de eliminación de metales pesados de aguas mediante la cáscara de *Moringa oleifera*, está realizado con el fin de ser aplicado en países en vías de desarrollo donde el bioadsorbente está disponible y poder mitigar así el problema relacionado con la calidad de sus aguas.

## 5. Conclusiones

La instalación diseñada para el tratamiento de aguas contaminadas por metales pesados mediante la técnica de bioadsorción, permite obtener de forma continua agua de calidad, apta para consumo humano en cuanto a metales pesados se refiere (en particular cadmio y cobre).

Mediante la técnica indicada, se consigue eliminar metales pesados del agua de forma efectiva y económica utilizando para ello la cáscara de la semilla de *Moringa oleifera* como un adsorbente natural.

La cáscara de semilla de *Moringa oleifera* es un residuo procedente de la etapa de extracción de aceite de semillas previo al proceso de coagulación. El empleo de la cáscara de *Moringa oleifera* como materia prima en la planta de bioadsorción, permite la valorización de este residuo contribuyendo así a garantizar la sostenibilidad del medio ambiente.

De acuerdo con la bibliografía consultada, los rendimientos obtenidos y mostrados en la presente contribución, sitúan a la cáscara de *Moringa oleifera* en un rendimiento mantenido superior al 85% en cuanto a la eliminación de los metales pesados estudiados del agua, y superior al 75% en cuanto a la regeneración del bioadsorbente.

## 6. Referencias

- Calero, M., Hernáinz, F., Blázquez, G., Tenorio, G., & Martín-Lara, M.A. (2009). Study of Cr (III) biosorption in a fixed-bed column. *Journal of Hazardous Materials*, 171, 886–893.
- Chu, K. H. (2004). Improved fixed bed models for metal biosorption. *Chemical Engineering Journal*, 97, 233–239.
- ECODES (2010). Nota de prensa. Obtenido desde: <http://www.ecodes.org/notas-de-prensa/dia-mundial-del-agua-2010#.UxOKA-N5P45>
- García-Fayos, B. (2009). *Optimización del proceso de extracción y caracterización del compuesto activo obtenido a partir de coagulantes naturales de origen vegetal. Aplicación en la potabilización del agua en países en vías de desarrollo*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia (España).
- Harikishore Kumar Reddy, D., Ramana, D.K.V., Seshaiyah, K., & Reddy, A.V.R. (2011). Biosorption of Ni(II) from aqueous phase by *Moringa oleifera* bark, a low cost biosorbent. *Desalination*, 268, 150-157.
- Kalavathy, M.H., & Miranda, L.R. (2010). *Moringa oleifera* – A solid phase extractant for the removal of copper, nickel and zinc from aqueous solutions. *Chemical Engineering Progress*, 158, 188-199.

- Mara, D. (2003). Water, sanitation and hygiene for the health of developing nations. *Public Health*, 117, 452–456.
- Mataka L.M., Sajidu S.M.I., Masamba W.R.L., & Mwatseteza, J.F. (2010). Cadmium sorption by *Moringa stenopetala* and *Moringa oleifera* seed powders: Batch, time, temperatura, pH and adsorption isotherm studies. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 2(3), 50-59.
- Mintz, E., Bartram, J., Lochery, P., & Wegelin, M. (2001). Not Just a Drop in the Bucket: Expanding Access to Point-of-Use Water Treatment Systems. *American Journal of Public Health*, 91, 1565-1570.
- Piris, J. (2013). *Diseño del protocolo de preparación y aplicación de bioadsorbentes a partir de moringa oleifera para la eliminación de metales pesados en aguas*. Proyecto final de carrera. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia (España).
- Sharma, P., Kumari, P., Srivastava, M.M., & Srivastava, S. (2007). Ternary biosorption studies of Cd(II), Cr(III) and Ni(II) on shelled *Moringa oleifera* seeds. *Bioresource Technology*, 98, 474-477.
- Villaescusa, I., Fiol, N., Martínez, M., Miralles, N., Poch, J., & Serarols, J. (2004). Removal of copper and nickel ions from aqueous solutions by grape stalks waste. *Water Research*, 38, 992-1002.
- Volesky, B. (1990). Removal and recovery of heavy metals by biosorption. En B. Volesky (Ed.), *Biosorption of Heavy Metals*, USA: CRC Press, Inc.
- Volesky, B. (2007). Biosorption and me. *Water Research*, 41, 4017-4029.
- Zinkus, G. A., Byers, W. D., & Doerr, W. W. (1998). Identify appropriate water reclamation technologies. *Chemical Engineering Progress*, 94, 19–31.