

**BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO  
DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *MORINGA OLEÍFERA***

**STEFANIA OVIEDO TAPIA**

**COD: 363212128**

**ERIKA JULIETH VILLALBA CORTÉS**

**COD: 363212145**

**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**GIRARDOT**

**2016**

**BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO  
DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *MORINGA OLEÍFERA***

**STEFANIA OVIEDO TAPIA**

**COD: 363212128**

**ERIKA JULIETH VILLALBA CORTÉS**

**COD: 363212145**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:**

**Ingeniero Ambiental**

**Director:**

**JOSÉ EVER RAMÍREZ CALDERÓN M.Sc.**

**Zootecnista**

**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**GIRARDOT**

**2016**



**UDEC**  
UNIVERSIDAD DE  
CUNDINAMARCA

**BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE  
VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera***

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

---

**Presidente del jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**



## **DEDICATORIA**

A Dios por brindarme la sabiduría y entendimiento cada día de mi vida, por ser mi guía y la luz de mi camino.

A mi madre por su dedicación y esfuerzo, por enseñarme a que los sueños son algo que se alcanzan con esmero y perseverancia.

A mi hermosa hija DANIELA quien con su alegría me impulsa cada día a ser mejor y a sobre pasar todos los obstáculos que se presentan a diario.

A mi abuela quien con su voz de aliento aumenta la fe ante los momentos de debilidad.

A mi familia Norma, Laura, Emanuel, Giovanny, Isabella y mi padre quienes siempre estuvieron ahí para apoyarme sinceramente.

A ti vida por tu apoyo incondicional, por tu paciencia y amor, Gracias por ser quien me anima a seguir adelante.

A mi compañera de trabajo de grado quien con sus conocimientos brindo aportes útiles y valiosos para el desarrollo de esta investigación.

A todos aquellos maravillosos seres que han compartido junto a mi sus enseñanzas y mis logros en estos años.

Erika.

**BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE  
VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera***

Dedico este trabajo de grado en mi primer lugar a todas las fuerzas que me ayudan a no decaer y mantener mis pasos constantes.

A mi madre Gloria Tapia por su amor incondicional, por el apoyo que siempre me brindo y por enseñarme el valor de la vida para seguir adelante, desde acá mi total dedicación a ella.

A mi padre Ricardo Oviedo por ser el motor que me impulsa cada día y ser la motivación constante que me ha permitido mejorar con el paso de los años.

A mis hermanos Jeyson y Camilo que con sus esfuerzos y consejos me han mostrado ejemplos de perseverancia y constancia a lo largo de nuestras convivencias y a mis sobrinos Juan Esteban, Marianella y Camilo, que son el motivo de mí sonreír.

A mi abuela Paula por la paciencia y el amor que me brinda infundado me el valor de la confianza en sí mismo.

A mi compañero de vida Sebastián Pacheco quien siempre me ha brindado su apoyo sincero y ha estado presente en mis buenos y dolorosos momentos.

A mis primas, Paula, Geraldine, Laura y Luciana que han sido las sonrisas que me alegran y me ayudan a salir adelante

A mis compañeras de estudio, Dayanna, Patricia, Gina y Paula, las cuales han hecho el paso de la universidad una gran oportunidad para establecer amistades con verdaderos sentimientos.

A mi Colega Erika, quien colaboro para la realización de este trabajo aportando ideas y acciones favorables.

Stefania.



## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a nuestro tutor de Trabajo de Grado José Ever Ramírez por su tiempo y disposición.

A los profesores Miguel Ávila quien con sus conocimientos y experiencia nos guio en el proceso investigativo.

A nuestros compañeros y amigos que siempre estuvieron dispuestos a ofrecernos su ayuda y colaboración.

A la universidad de Cundinamarca y al cuerpo de docentes por brindarnos el espacio y las oportunidades de aprender cada día más.

A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Corpoíca Nataima, por facilitar el material biológico (Vainas de Moringa) para el presente estudio.



## **CONTENIDO**

<b>RESUMEN.....</b>	<b>24</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>26</b>
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>28</b>
<b>2. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>29</b>
<b>3. HIPÓTESIS .....</b>	<b>31</b>
<b>4. OBJETIVOS.....</b>	<b>32</b>
<b>4.1. OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>32</b>
<b>4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS .....</b>	<b>32</b>
<b>5. MARCO REFERENCIAL.....</b>	<b>33</b>
<b>5.1. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>33</b>
<b>5.1.1. METALES PESADOS .....</b>	<b>33</b>
<b>5.1.2. CADMIO, PLOMO Y COBRE .....</b>	<b>40</b>
<b>5.1.3. TÉCNICAS PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS RESIDUALES .....</b>	<b>43</b>
<b>5.1.4. TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES .....</b>	<b>43</b>
<b>5.1.5. ADSORCIÓN.....</b>	<b>46</b>
<b>5.1.6. BIOADSORCIÓN .....</b>	<b>49</b>
<b>5.1.7. BIOADSORVENTES .....</b>	<b>55</b>
<b>5.1.8. MODELIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE EQUILIBRIO.....</b>	<b>58</b>
<b>5.1.9. ÁRBOL DE LA <i>Moringa oleífera</i>.....</b>	<b>60</b>
<b>5.2. MARCO GEOGRÁFICO.....</b>	<b>66</b>
<b>5.3. MARCO LEGAL.....</b>	<b>67</b>
<b>6. METODOLOGIA.....</b>	<b>69</b>
<b>6.1. ETAPA 1. ESTUDIO PRELIMINAR.....</b>	<b>70</b>
<b>6.2. ETAPA 2. TRABAJO DE CAMPO .....</b>	<b>70</b>
<b>6.2.1. Recolección del material vegetal y tratamiento físico de la biomasa ....</b>	<b>70</b>
<b>6.2.2. Cuantificación de Taninos en el material bioadsorbente.....</b>	<b>71</b>
<b>6.3. ETAPA 3. PRUEBAS DE LABORATORIO .....</b>	<b>71</b>
<b>6.3.1. Preparación de la solución de Cloruro de Mercurio (HgCl<sub>2</sub>) .....</b>	<b>71</b>
<b>6.3.2. Proceso de bioadsorción de iones de Mercurio (Hg<sup>+2</sup>) .....</b>	<b>71</b>
<b>6.4. ETAPA 4. ANÁLISIS DE DATOS.....</b>	<b>73</b>



**BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE  
VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera***

<b>6.5. TECNICAS O INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS.....</b>	<b>74</b>
<b>6.6 ANÁLISIS DE CUANTIFICACIÓN DE TANINOS EN EL MATERIAL BIOADSORBENTE.....</b>	<b>75</b>
<b>6.8. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.....</b>	<b>75</b>
<b>7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>77</b>
<b>7.1. PROCESO DE RETENCIÓN DE IONES DE Hg<sup>+2</sup> POR MEDIO DE LOS TANINOS PRESENTES EN LAS VINAS DE <i>Moringa oleífera</i>.....</b>	<b>77</b>
<b>7.2. PORCENTAJE DE REMOCION DE IONES DE Hg<sup>+2</sup>.....</b>	<b>78</b>
<b>7.3. DETERMINAR EL TIEMPO ÓPTIMO DONDE SE ALCANCE LA MAYOR RETENCIÓN DEL MERCURIO .....</b>	<b>81</b>
<b>7.4. DETERMINACIÓN DE LA ISOTERMA DE LANGMUIR.....</b>	<b>83</b>
<b>8. CONCLUSIONES.....</b>	<b>85</b>
<b>9. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>86</b>
<b>10. ANEXOS.....</b>	<b>88</b>
<b>11. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>95</b>



**LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Características de los adsorbentes más comunes. ....	48
Tabla 2. Algunos adsorbentes utilizados en estudios de bioadsorción.....	57
Tabla 3. Capacidades de adsorción de Hg con diferentes tipos de materiales.....	58
Tabla 4. Taxonomía De La Especie Vegetal <i>Moringa oleífera</i> .....	61
Tabla 5. Características morfológicas de la <i>Moringa oleífera</i> .....	61
Tabla 6. Marco Legal referente a la contaminación hídrica en Colombia .....	67
Tabla 7. Tratamientos para el proceso de Bioadsorción de iones de Hg <sup>+2</sup> .....	72
Tabla 8. Instrumentos y reactivos utilizados en el proyecto de investigación .....	74
Tabla 9. Porcentaje de Remoción de iones de Hg <sup>+2</sup> en cada tratamiento .....	78
Tabla 10. Test de Kruskal-wallis con respecto a la biomasa .....	80
Tabla 11. Test de Kruskal-wallis respecto al tiempo de bioadsorción.....	82



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura química de la Lignina .....	56
Figura 2. Estructura química de la Molécula de Tanino .....	57
Figura 3. Raíz de la <i>Moringa oleífera</i> .....	62
Figura 4. Hojas de la <i>Moringa oleífera</i> .....	62
Figura 5. Flores de la <i>Moringa oleífera</i> .....	62
Figura 6. Tallo de la <i>Moringa oleífera</i> .....	62
Figura 7. Fruto de la <i>Moringa oleífera</i> .....	63
Figura 8. Semilla de la de la <i>Moringa oleífera</i> . .....	63
Figura 9. Usos potenciales de diferentes partes de la planta <i>Moringa oleífera</i> en la industria y producción de alimentos .....	64
Figura 10. Ubicación área de estudio .....	66
Figura 11. Procedimiento empleado en el proyecto de investigación .....	69
Figura 12. Procedimiento de Bioadsorción de iones de $Hg^{+2}$ Usando <i>Moringa oleífera</i> como bioadsorbente .....	73
Figura 13. Porcentaje de Remoción de iones de $Hg^{+2}$ .....	79
Figura 14. Bioadsorción de iones de $Hg^{+2}$ respecto al tiempo .....	82
Figura 15. Análisis de caja y bigotes del tiempo de bioadsorción .....	83



**LISTA DE ANEXOS**

Anexo A. Protocolo de recolección de vainas especie arbórea: *Moringa oleífera*. 88

Anexo B. Cuantificación de taninos por el método analítico de espectrofotometría ultravioleta-visible ..... 93

Anexo C. Análisis de espectrofotometría de adsorción de los iones de  $Hg^{+2}$  ..... 94

**LISTA DE ABREVIATURAS**

<b>Hg</b>	Mercurio
<b>mg</b>	Miligramo
<b>L</b>	Litros
<b>Kg</b>	Kilogramo
<b>ICA</b>	Índice de calidad del agua
<b>IDEAM</b>	Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales
<b>HgCl<sup>2</sup></b>	Cloruro mercúrico
<b>MeHg</b>	Metilmercurio
<b>g</b>	Gramos
<b>mL</b>	Mililitros
<b>pH</b>	Potencial de Hidrogeno
<b>Hg<sup>+2</sup></b>	Mercurio Inorgánico
<b>µg</b>	Microgramos
<b>ppm</b>	Partes por millón
<b>Ppb</b>	Partes por billón
<b>rpm</b>	Revoluciones por minutos
<b>T<sub>1/2</sub></b>	T (Tratamientos), <sub>1</sub> como número inicial indica la cantidad de biosorbente que se utiliza y <sub>2</sub> el tiempo de contacto del biosorbente con el Hg <sup>+2</sup>
<b>EAA</b>	Espectrofotometría de adsorción atómica
<b>mm</b>	Milímetros
<b>min</b>	Minutos



## GLOSARIO

**ADSORBATO:** Nombre que adquiere el soluto disuelto en una corriente, gas o líquida, al ser retenido sobre la superficie de un sólido adsorbente.<sup>1</sup>

**BIOMASA:** Es el conjunto de materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma<sup>2</sup>.

**BIOSORBATO:** Sustancia que se concentra en la superficie o se bioadsorbe<sup>3</sup>.

**BIOSORBENTE:** Son materiales derivados de microorganismos, bacterias, hongos, algas marinas, plantas o algunos polímeros naturales. Los biosorbentes son capaces de adsorber especies iónicas de metales en soluciones acuosas, esta propiedad es bien utilizada en la biorremediación y recuperación de efluentes industriales contaminados con metales pesados<sup>4</sup>.

**BIOSORCIÓN:** Término empleado para describir el fenómeno de captación pasiva, de sustancias contaminantes, basado en la propiedad que ciertos tipos de biomasa inactivas o muertas de poder enlazar y acumular diferentes tipos de contaminantes.<sup>5</sup>

**ISOTERMA:** Es la relación que existe entre la cantidad de sustancia adsorbida por un adsorbente y la presión o concentración de equilibrio a una temperatura constante.<sup>6</sup>

**pH:** Abreviatura de Potencial de Hidrogeno, se establece como la medida de la acidez o de la alcalinidad de una sustancia.<sup>7</sup>

**REGRESIÓN LINEAL:** Es una técnica que permite cuantificar la relación que puede ser observada cuando se grafica un diagrama de puntos dispersos

<sup>1</sup> Boada Priscila. Estudio del proceso de biosorción de contaminantes en efluentes acuosos mediante cilantro (*coriandrum sativum*). 2015.

<sup>2</sup> Toscano Morales, L. A. (2009). Análisis de los parámetros y selección de hornos para la combustión de la biomasa. Ecuador.

<sup>3</sup> Ramos Jaidith. Estudio del proceso de biosorción de colorantes sobre borra (cuncho) de café. 2010.

<sup>4</sup> Muñoz Carpio, J. C. (2017). Biosorción de plomo (II) por cáscara de naranja "citrus. Perú.

<sup>5</sup> Ibid, p. 24.

<sup>6</sup> Ibid, p. 32.

<sup>7</sup> Gonzales Carmen. Monitoreo de calidad de agua. 2011.



## BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera*

correspondientes a dos variables, cuya tendencia general es rectilínea; esta relación se representa por una ecuación donde el mejor ajuste corresponde al valor que presenta el menor error.<sup>8</sup>

**SITIOS DE SORCIÓN:** Este término es usado para describir distintas interacciones entre el sorbato y el sorbente como las interacciones intermoleculares como los del tipo enlaces de hidrógeno a través de cargas superficiales presentes en el sorbente. También la interacción puede darse por enlaces químicos debido a grupos funcionales que posee posibilitando a su vez mecanismos de intercambio iónico.<sup>9</sup>

**SORBATO:** Ion o molécula que es potencialmente capaz de unirse a un sorbente.<sup>10</sup>

**SORBENTE:** Material orgánico o inorgánico capaz de unir iones o moléculas.<sup>11</sup>

---

<sup>8</sup> Ibid., p. 26.

<sup>9</sup> Soto Edgar. Estudio de la remoción de Cu (II) en medio acuoso utilizando el albedo de la cáscara de naranja. 2009.

<sup>10</sup> Mejía Gregory. Aproximación teórica a la biosorción de metales pesados por medio de microorganismos. (s.f.)

<sup>11</sup> Ibid., p. 27.



## **RESUMEN**

En la actualidad, la contaminación del agua por metales pesados se ha convertido en un problema ambiental en todo el mundo. Recientemente, la bioadsorción se ha propuesto como un procedimiento de tratamiento alternativo. Además, el mayor interés es la mejora de los residuos agroindustriales como materia prima para la producción de nuevos materiales. En este sentido, el objetivo de este estudio es Evaluar la capacidad de remoción de Mercurio, mediante procesos de bioadsorción, a partir del uso de vainas secas de la especie arbórea *Moringa oleífera*. Las vainas utilizadas fueron recolectadas centro de investigación CORPOICA Nataima, ubicado en el km 9 vía Espinal- Chicoral. Después de secado, molido y tamizado hasta un tamaño de partícula de 1 mm, se caracterizaron por Espectrofotometría Ultravioleta Visible. El potencial de las vainas de moringa para la remoción de cobre se ensayó en diferentes condiciones de pH (7), biomasa (5, 10 y 15g), concentración de metal (97 ppm), tiempo de contacto (20, 60 y 100 min) y volumen de solución (1 L). La concentración de metal residual se midió por espectrofotometría de absorción atómica (AAS). Los resultados mostraron que este biomaterial contiene taninos, que a su vez están compuestos por grupos polihidroxi-polifenol, adecuados para la retención de iones metálicos. La eliminación óptima de iones de  $Hg^{+2}$  se puede lograr a pH 7. De acuerdo con los resultados obtenidos, las vainas de moringa tienen características para aplicaciones de remediación de iones de mercurio de aguas contaminadas a bajo costo, fácil adquisición, eco-amigable y pH relativamente neutro.

**Palabras Claves:** Espectrofotometría, remoción, concentración, taninos y polihidroxi-polifenol.

## ABSTRACT

At present, the pollution of the water by heavy metals has turned into an environmental problem into the whole world. Recently, the Bio-adsorption has proposed as a procedure of alternative treatment. In addition, the major interest is the improvement of the agroindustrial residues as raw material for the production of new materials. In this respect, the aim of this study is to evaluate the capacity of removal of Mercury, by means of processes of bioadsorción, from the use of dry pods of the arboreal species *Moringa oleífera*. The used pods were gathered center of investigation CORPOICA Nataima, located in the km 9 Espinal route - Chicoral. After dried, ground and sifted up to a size of particle of 1 mm, they were characterized by Visible ultraviolet spectrophotometry. The potential of the pods of moringa for the removal of copper practised in different conditions of pH (7), biomass (5, 10 and 15g), metal concentration (97 ppm), time of contact (20, 60 and 100 min) and volume of solution (1 L). The concentration of residual metal measured up for spectrophotometry of atomic absorption (AAS). The results showed that this biomaterial contains tannins, which in turn are composed by groups Polyhydroxy-polyphenol, adapted for the retention of metallic ions. The ideal elimination of ions of  $Hg^{+2}$  can achieve to pH 7. In agreement with the obtained results, the pods of moringa have characteristics for applications of remediation of ions of mercury of waters contaminated the easy acquisition, amicable echo and pH relatively neutral.

**Key words:** Spectrophotometry, removal, concentration, tannins and polihidroxi-polifenol

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las actividades industriales y mineras implican una preocupación en la salud pública y en el medio ambiente<sup>12</sup>, esto es debido a la mala disposición final de algunas sustancias tóxicas; plomo, mercurio, cadmio, arsénico, cromo<sup>13</sup>, entre otros, los cuales son dirigidos a las fuentes hídricas, generando de manera exponencial el deterioro a los ecosistemas tanto terrestres como acuáticos.

Colombia no es la excepción a esta problemática, por ejemplo, en la extracción de oro artesanal que se realiza en el bajo Cauca antioqueño, se están vertiendo aproximadamente 67 ton/año de mercurio a ríos y arroyos, con los consecuentes daños que este supone a la salud y a los sistemas naturales<sup>14</sup>, además de esto la OMS clasifica al mercurio como “uno de los diez productos o grupos de productos químicos que plantean especiales problemas de salud pública”<sup>15</sup>.

La contaminación por metales pesados y el impacto en la salud pública, ha conducido al hombre a buscar alternativas para resolver este problema, utilizando métodos tradicionales como son: Osmosis inversa, electrodiálisis, ultrafiltración, intercambio iónico y precipitación química<sup>16</sup>; pero el alto costo de los métodos convencionales llevó al desarrollo de alternativas tecnológicas, las cuales, además de aprovechar y aplicar los procesos naturales que ocurren en un ecosistema para depurar un residuo contaminante, ofrecen la posibilidad de recuperar los recursos presentes en el mismo para su posterior uso, generándose además, un valor económico que contribuye a la sostenibilidad del sistema.

Una de estas nuevas tecnologías en el proceso de biosorción el cual consiste en contacto sólido-líquido que lleva consigo ciclos de sorción y desorción del metal<sup>17</sup>,

<sup>12</sup> Bermeo, A. (s.f.). Medio ambiente y periodismo. Recuperado el 08 de 02 de 2017

<sup>13</sup> ciencias de la tierra y del medio ambiente. (s.f.). Metales tóxicos.

<sup>14</sup> Colombia Minera (2011).

<sup>15</sup> Organización Mundial de la Salud. (01 de 2016). El mercurio y la salud. Recuperado el 08 de 02 de 2017.

<sup>16</sup> Wang, L.K., et al. Heavy Metals in the Environment, 2009.

<sup>17</sup> Gomis, A. M. (1998). Publicaciones Universidad de Alicante. Recuperado el 08 de 02 de 2017, de introducción, a las operaciones de separación "Cálculo por etapas de equilibrio" Pag. 2000



## **BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera***

la cual es usada en los procesos “limpios” de remediación ambiental, esta biotecnología es de menor costo, gracias a que se usa el material vegetal seco como biosorbente. En el presente trabajo se realizó un estudio con el fin de evaluar la remoción de mercurio, usando tres cantidades de biomasa de la *Moringa oleífera* en tres tiempos distintos, mediante el proceso de bioadsorción expuesta a un agua contaminada con Cloruro de mercurio ( $\text{HgCl}_2$ ), y de este modo brindar soluciones eficientes y de bajo costo.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente las actividades humanas poco sostenibles afectan al medio ambiente de forma directa generando emisiones contaminantes, a partir de ello se desenlazan problemas más significativos como la contaminación de las fuentes hídricas por vertimientos de metales pesados<sup>18</sup>, este grupo se cataloga como peligroso por sus debidos procesos de intoxicación en pocas concentraciones siendo casi letal<sup>19</sup>; la degradación hídrica por motivo de sustancias tóxicas causa un macroproblema debido al escalonamiento en la cadena trófica, ejemplarizando el contacto con los peces generando bioacumulación en los tejidos nerviosos y saltando de allí a la ingesta humana<sup>20</sup>, es decir, se biomagnifica, obteniendo como resultado la nocividad en los ecosistemas y por ende en la salud de los seres humanos.

El caso particular del Mercurio, el cual es un representante de los efectos nocivos ya nombrados por los metales pesados, también se destaca por otros debido al metil-mercurio  $[CH_3Hg]^+$ , quien es el que desglosa las potencialidades perjudiciales de este elemento, con problemas neurológicos seguidos por padecimientos renales, cardiovasculares, reproductivos, y notables efectos en el sistema inmunológico afectando adultos y a niños, la principal exposición para que estos daños aparezcan es por medio de la ingesta de pescado, indicando que el 100% del metil-mercurio  $[CH_3Hg]^+$ , presente en los pescados se absorbe gastrointestinalmente<sup>21</sup>.

Las soluciones a este tema, son los procesos rigurosos, de mayor demanda de tiempo, requerimientos de personal capacitado y de un gran capital económico, teniendo como prospecto la posibilidad o no de que sea efectivo, resaltando de una u otra forma las problemáticas del descuido de las fuentes de agua, debido a que cualquier especie basa su existencia en este recurso.

<sup>18</sup> Eróstegui Carlos, Contaminación Por Metales Pesados, Bolivia, 2009.

<sup>19</sup> Raiman, Ximena. et al, Mercurio en pescados y su importancia en la salud, Chile, 2014.

<sup>20</sup> Mancera, Nestor. et al, estado del conocimiento de las concentraciones de mercurio y otros metales pesados en peces dulceacuícolas de Colombia, Bogotá, 2005.

<sup>21</sup> Marrugo, José. Evaluación de la contaminación por metales pesados en la ciénaga La Soledad y Bahía de Cispatà cuenca del bajo Sinú, departamento de Córdoba, 2011.



## 2. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, existe una gran preocupación a nivel mundial, debido al considerable incremento en los índices de contaminación de efluentes industriales por parte de metales pesados tales como el cromo, níquel, cadmio, plomo y mercurio<sup>22</sup>. Estas sustancias tóxicas tienden a persistir indefinidamente en el medio ambiente, comprometiendo el bienestar y equilibrio no solo de la fauna y la flora existente en dicho ecosistema sino también la salud de las personas residentes en las comunidades aledañas, mediante su acumulación e ingreso a la cadena trófica.

Entre los diversos efectos producidos por los metales pesados en las plantas se tiene, la necrosis en las puntas de las hojas, la inhibición del crecimiento de las raíces y en el peor de los casos la muerte total de la planta<sup>23</sup>. En los seres humanos los metales pesados pueden llegar a ser muy tóxicos al introducirse en el organismo. En elevadas concentraciones, estos pueden ocasionar: erupciones cutáneas, malestar de estómago (úlceras), problemas respiratorios, debilitamiento del sistema inmune, daño en los riñones e hígado, hipertensión, alteración del material genético, cáncer, alteraciones neurológicas e incluso la muerte<sup>24</sup>.

Debido al impacto ambiental generado por estas sustancias tóxicas se puso a prueba la eficiencia de las vainas de la *Moringa oleífera* para remover mercurio; se escogió este metal puesto que la Organización Mundial de la Salud (OMS) lo clasifica como uno de los diez principales productos químicos de mayor preocupación para la salud pública<sup>25</sup>. Esta investigación buscó reconocer la capacidad de bioadsorción del ión mercurio a tres diferentes tiempos (20, 60 y 100 min) de contacto con tres cantidades de biomasa de la *Moringa oleífera* (5, 10 y 15 g), expuesta a una agua contaminada con Cloruro de Mercurio al 100%

<sup>22</sup> Ciencias De La Tierra Y Del Medio Ambiente. (s.f.). Metales tóxicos.

<sup>23</sup> Buechel, T. (14 de julio de 2016). *Rol del níquel en el cultivo de plantas*. Recuperado el 08 de 02 de 2017.

<sup>24</sup> James F. Balch, P. A. (1994). *Parte II Problemas de la Salud*. Recuperado el 08 de 02 de 2017.

<sup>25</sup> Organización Mundial de la Salud. (01 de 2016). El mercurio y la salud. Recuperado el 05 de 09 de 2016.



## **BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera***

obteniendo una concentración inicial de [97 ppm], puesto Hidalgo, 2004<sup>26</sup>, afirma que con una concentración menor de 100 ppm es posible realizar un proceso de bioadsorción y de este modo encontrar que biomasa en que tiempo remueve eficientemente los iones de mercurio y de este modo obtener datos en la remoción de mercurio aprovechando la tecnología de la bioadsorción ya que es una técnica de bajo costo y de fácil implementación para cumplir con los parámetros exigidos por la normatividad colombiana vigente.

---

<sup>26</sup> Hidalgo, Soraya. 2004. Reutilización de residuos de rapa para la eliminación de metales tóxicos en efluentes líquidos.



### **3. HIPÓTESIS**

La siguiente fue la hipótesis planteada en esta investigación:

Ho: Confirmar si las vainas de *Moringa oleífera* presentan capacidades de bioadsorción de iones de mercurio a una concentración de 97 ppm con tres tiempos y tres cantidades de biomasa.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la capacidad de remoción de Mercurio, mediante procesos de bioadsorción, a partir del uso de vainas secas de la especie arbórea *Moringa oleífera*.

### **4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Establecer el porcentaje de remoción del mercurio con diferentes cantidades de biomasa de vainas de *Moringa oleífera*
- Determinar el tiempo óptimo donde se alcance la mayor retención del mercurio.
- Comprobar la cantidad de mercurio retenido aplicando la isoterma de Langmuir.

## 5. MARCO REFERENCIAL

### 5.1. MARCO TEÓRICO

El análisis de la capacidad de adsorción de metales pesados y otros compuestos contaminantes por materiales naturales requiere abarcar el conocimiento de diferentes áreas que van desde la química del propio metal objeto de estudio, las propiedades del adsorbente y sus características estructurales, hasta el estudio de los parámetros que definen la interacción entre ambos. Así, a lo largo de esta sección, se hará una revisión de los aspectos fundamentales de este tema comenzando por los metales pesados y sus propiedades químicas, su toxicidad y sus principales fuentes de contaminación ambiental, así como las tecnologías más utilizadas para eliminarlos; con especial atención a las características del mercurio.

#### 5.1.1. METALES PESADOS

Entre los elementos químicos conocidos, existen en torno a 80 metales que pueden dividirse en dos grupos: los que son esenciales para la vida (como el hierro o el calcio) o aquellos que no son esenciales y presentan elevada toxicidad (como el plomo y el cadmio). Estos metales tóxicos no se degradan por vía metabólica y su acumulación en tejidos vivos causa serios daños en la salud. Además, la descarga y elevada concentración en aguas naturales hace que puedan circular a través de la cadena alimentaria. Estos elementos pueden entrar en el medioambiente por procesos naturales o antropogénicos. La contaminación derivada de procesos antropogénicos puede dar lugar a concentraciones locales elevadas de dichos compuestos, originando efectos nocivos en animales y en seres humanos<sup>27</sup>.

Muchos elementos metálicos juegan un papel esencial en los organismos vivos ya que constituyen un requerimiento nutricional, pero un exceso de estos elementos y

<sup>27</sup> Wang, L.K., Chen J.P., Hung Y., Shamas N.K. Heavy Metals in the Environment, 2009.



## BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera*

sobre todo su substitución por aquellos compuestos no esenciales, puede dar lugar a intoxicaciones o incluso la muerte de los organismos. Los seres humanos reciben las dosis necesarias de estos elementos traza a través de la cadena alimentaria. La asimilación de metales tiene lugar en las plantas o a nivel microbiano, y los elementos tienden a concentrarse al ascender en la cadena alimentaria, por lo que cantidades excesivas que aumentan al avanzar a lo largo del ciclo alimentario puede derivar en problemas directos en la salud humana<sup>28</sup>. Este fenómeno de incremento de concentración de los metales en cada nivel de la cadena alimentaria se conoce como bio-magnificación<sup>29</sup>.

Los metales pesados se utilizan en muchos procesos industriales debido a su importancia tecnológica. En las últimas décadas, el rápido desarrollo de actividades como la minería, utilización de galvanizados, industrias de fertilizantes, empleo de baterías, industria del papel y pesticidas, ha elevado las descargas indirectas o directas de aguas residuales con elevado contenido en metales pesados. Los residuos provenientes de estos procesos deben ser convenientemente tratados para evitar la contaminación medioambiental y los efectos en el organismo de las especies vivas<sup>30</sup>.

Algunos de los metales pesados tóxicos de mayor importancia en el tratamiento de aguas residuales son el zinc, cobre, níquel, cadmio, plomo, cromo y mercurio. Como se ha descrito en la introducción, este trabajo se centra principalmente en el mercurio y su eliminación en aguas contaminadas.

### 5.1.1.1. MERCURIO

El mercurio es un metal denso y de color blanco plateado que funde a  $-38.9^{\circ}\text{C}$ . Sobre la superficie terrestre está presente en una concentración media de 0.08

<sup>28</sup> Wang, L.K., et al. Heavy Metals in the Environment, 2009.

<sup>29</sup> Cuizamo, Norma Y Navarro, Abel. Biosorción de metales pesados por algas marinas: posible solución a la contaminación a bajas concentraciones, 2013.

<sup>30</sup> Febriato, J. Equilibrio y estudios cinéticos de adsorción de metales pesados utilizando biosorbente : Un resumen de los estudios recientes, 2009.



mg·kg. Las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias contienen mercurio en concentraciones superiores a 0.25, 0.40 y 3.25 mg/kg, respectivamente<sup>31</sup>.

El mercurio en el medio acuático existe esencialmente en tres formas: mercurio elemental,  $Hg^0$  ; mercurio inorgánico, como ion divalente  $Hg^{+2}$ , que puede aparecer hidratado o completado con cloruro, sulfuro, hidróxido o con materia orgánica disuelta<sup>32</sup> y mercurio orgánico, principalmente como monometil mercurio que es la especie más nociva para la salud humana<sup>33</sup>. Su toxicidad se relaciona con la elevada biomagnificación a través de la cadena alimentaria (por encima de 106) y por su gran liposolubilidad<sup>34</sup>. Con una solubilidad de 0.08 mg/L a 25°C, el  $Hg^0$  es un componente común en las aguas naturales, se encuentra en las profundidades del océano y habitualmente está supersaturado, especialmente en aguas superficiales y en las capas medias constituye cerca del 50% del mercurio total<sup>35</sup>.

#### 5.1.1.1.1. Reducción del Mercurio

Cuando se estudia la química del mercurio en disolución, es fundamental considerar la importancia de las reacciones de reducción de este metal. Estas reacciones dependen directamente de las condiciones del medio y de la presencia de sustancias orgánicas que favorezcan el proceso redox.

En el medio natural la reducción de  $Hg^{+2}$  a  $Hg^0$  se puede iniciar principalmente por microorganismos, por fotólisis directa o por sustancias húmicas. La reducción fotoquímica tiene lugar en aguas superficiales en presencia de oxígeno o a través de microorganismos y particulado mineral en medios anóxicos<sup>36</sup>.

<sup>31</sup> Ibid. p.12.

<sup>32</sup> Leopold, K. et al. Los métodos para la determinación y especiación del mercurio en las aguas naturales, 2010.

<sup>33</sup> Merian, E. and Clarkson, T. W. Metals and their compounds in the environment: occurrence, analysis, and biological relevance, 1991.

<sup>34</sup> Gao, Y. et al. Determinación y especiación de mercurio en muestras ambientales y biológicas mediante espectrometría atómica analítica, 2012.

<sup>35</sup> Ibid, p. 65.

<sup>36</sup> Zheng, W., Liang L.Y., Gu B.H. Mercury Reduction and Oxidation by Reduced Natural Organic Matter in Anoxic Environments. 2012.



## BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera*

La materia orgánica disuelta que se encuentra en el medio acuático enlaza fuertemente a los metales, afectando a su especiación, solubilidad, movilidad y toxicidad y en particular, interacciona con el mercurio de formas diferentes y modifica su transporte, transformación y biodisponibilidad.

En el medio acuático, el 80% de la materia orgánica disuelta está formada por sustancias húmicas, una mezcla compleja que proviene de residuos de la descomposición de animales y plantas. El mercurio y otros metales traza están generalmente enlazados a los grupos ácidos de la materia orgánica; siendo los más abundantes los ácidos carboxílicos y los fenoles. Las fracciones de ácidos fúlvicos y húmicos en la materia orgánica son capaces de reducir el mercurio iónico a mercurio metálico. Asimismo, la disponibilidad de mercurio puede disminuir para los procesos de metilación gracias a que la materia orgánica mejora la reducción fotoquímica de  $Hg^{+2}$  a  $Hg^{0}$ <sup>37</sup>.

Algunos estudios demuestran que en ambientes anóxicos, la materia orgánica reducida no sólo es capaz de llevar a cabo la reducción del mercurio sino que también reacciona con el  $Hg^0$  para formar complejos Hg-materia orgánica<sup>38</sup>. Las sustancias húmicas acuáticas tienen una elevada capacidad de complejación de metales, debido principalmente a la presencia de grupos 16 Revisión bibliográfica carboxílicos; además, la presencia de grupos sulfuro en las sustancias húmicas hace que se formen complejos estables con el mercurio. En aguas naturales, la especiación de este metal está gobernada por los complejos Hg-ácidos húmicos.<sup>39</sup>

Se ha comprobado que la presencia de iones que compiten con el metal, como el  $Cl^-$  que forma complejos con el mercurio o el europio que a su vez se compleja con los ácidos fúlvicos presentes en el medio, puede inhibir la reducción del  $Hg^{+2}$ <sup>40</sup>.

<sup>37</sup> Ravichandran, M. Interactions between mercury and dissolved organic matter- a review. 2004.

<sup>38</sup> Gu, B.H., et al. Mercury reduction and complexation by natural organic matter in anoxic environments 2011.

<sup>39</sup> Allard, B. Abiotic Reduction of Mercury by Humic Substances in Aquatic System. An important process for the mercury cycle. 1991.

<sup>40</sup> Allard, B. Abiotic Reduction of Mercury by Humic Substances in Aquatic System. An important process for the mercury cycle. 1991.

#### 5.1.1.1.2. Fuentes de Mercurio

El mercurio puede entrar en el medioambiente a través de diferentes fuentes que individualmente no contribuyen en exceso a la toxicidad del metal, pero el efecto global puede ser importante. Las fuentes de mercurio se podrían agrupar en naturales, antropogénicas y reemisiones.

Las principales fuentes de contaminación en el agua son<sup>41</sup>:

- Depositiones atmosféricas. El mercurio se encuentra principalmente en estado gaseoso y por su elevada volatilidad puede permanecer en la atmósfera más de un año. Otra fracción de este metal se encuentra formando parte del particulado atmosférico. Además, debido a los procesos de oxidación atmosféricos, el  $Hg^0$  pasa a  $Hg^{+2}$  que tiende a precipitar sobre la superficie terrestre.
- Fuentes derivadas de la erosión. Los procesos erosivos naturales o derivados de la actividad humana provocan contaminación de depósitos acuáticos adyacentes a suelos contaminados.
- Fuentes urbanas. La alteración del ciclo del mercurio por actividades humanas incrementa la presencia del metal en el medio.
- Fuentes agrícolas. Aunque en la actualidad están restringidos, los pesticidas y fungicidas con contenido en mercurio fueron usados en agricultura durante un largo periodo de tiempo y debido a la persistencia del metal en el medioambiente todavía existen hoy en día problemas de contaminación por su uso masivo en el pasado.
- Fuentes mineras. Incluye minas de plata, oro, mercurio y plomo.
- Procesos industriales y combustión. El mercurio de las combustiones va a la atmósfera depositándose más tarde en la superficie terrestre y en las aguas o permaneciendo en la atmósfera pasando a formar parte del ciclo del metal. Las plantas químicas son el principal foco de contaminación industrial. Cabe destacar

<sup>41</sup>Wang, Q. et al., Source and remediation for mercury contamination in aquatic systems, 2004.



las aguas residuales de blanqueo de pasta de papel, donde se lleva en cabo la electrolisis en celdas de mercurio, así como contribuciones de industrias de refinado de petróleo, plásticos o baterías<sup>42</sup>.

#### 5.1.1.1.3. Toxicidad

La elevada toxicidad del mercurio ya se conocía en la época romana y el antiguo oriente; sin embargo, los primeros casos de intoxicación por este metal no se registraron hasta los siglos XVIII y XIX.

El uso del mercurio está cada vez más restringido y controlado, pero tanto el metal como sus compuestos se siguen empleando en preparaciones dentales, termómetros, lámparas fluorescentes y ultravioleta y en productos farmacéuticos, como fungicidas en pinturas, aguas de procesos industriales y revestimiento de semillas. La industria del papel también consume grandes cantidades de este metal como fenil acetato de mercurio, un fungicida, así como en sosa caústica, que puede contener más de 5 mg·kg<sup>-1</sup> de impurezas<sup>43</sup>. A lo largo de la historia, este metal se ha utilizado ampliamente con fines terapéuticos, tratándose con él casos de sífilis, empleándose el HgCl<sub>2</sub> como antiséptico y llegando incluso a servir como diurético a principios del siglo XX. Pero su elevada toxicidad, hizo que se eliminase esta aplicación del metal<sup>44</sup>. El mercurio puede causar efectos adversos sobre el sistema nervioso central, afectar a la función renal y causar alteraciones cromosómicas. También puede causar ceguera, parálisis o daños en el feto. El envenenamiento por mercurio es difícil de detectar debido a su carácter acumulativo, sus efectos no son inmediatos y muchos de los síntomas tienen un origen psicopatológico<sup>45</sup>.

<sup>42</sup>Merian, E. and Clarkson, T. W. Metals and their compounds in the environment: occurrence, analysis, and biological relevance, 1991.

<sup>43</sup>Ibid, p. 33.

<sup>44</sup>Merian, E. and Clarkson, T. W. Metals and their compounds in the environment: occurrence, analysis, and biological relevance, 1991.

<sup>45</sup>Manahan, S. Environmental Chemistry. Lewis Publishers Boca Ratón. 1994.



## BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera*

La apariencia, carácter y extensión de la toxicidad depende de un gran número de factores: la forma química, el compuesto de mercurio y su potencial de ionización, la dosis, la duración de la exposición y la ruta de administración.

Su absorción como mercurio metálico a través de la ingestión es despreciable. En humanos, la ingestión accidental de mercurio metálico aumenta los niveles de mercurio en sangre, pero sólo en algunos casos estas dosis pueden causar enfermedades clínicas. Las sales solubles de  $Hg^{+2}$  se absorben poco y las pocas sales solubles de  $Hg^{+1}$  se absorben todavía menos que las anteriores. Sin embargo, el mercurio orgánico es rápidamente absorbido en humanos, con valores del 95% de absorción. La absorción depende del tamaño de partícula, solubilidad y del grado de descomposición de las sales en los fluidos biológicos<sup>46</sup>.

Uno de los episodios más destacados de contaminación por este metal fue el de la bahía de Minamata (Japón), donde en el periodo de 1953 a 1960 se dieron 111 casos de envenenamiento por mercurio y 43 muertes entre la gente que había consumido pescado procedentes de la bahía. La contaminación se debía a vertidos procedentes de una planta química. Los daños causados afectaron también a niños cuyas madres habían consumido este pescado durante el embarazo. Otro episodio de envenenamiento por mercurio tuvo lugar en Iraq en 1972, donde se consumió grano tratado con fungicidas que contenían mercurio orgánico<sup>47</sup>.

La Agencia Americana de Protección Medioambiental (EPA) ha estimado concentraciones de mercurio en aire de  $5 \cdot 10^{-6} \text{ mg} \cdot \text{m}^3$  en zonas rurales y de  $3 \cdot 10^{-5}$  en zonas urbanas. Las concentraciones del metal en aguas potables y superficiales se encuentran habitualmente por debajo de  $0.001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , si se supera este nivel es debido a efluentes industriales<sup>48</sup>.

<sup>46</sup> Wang, L.K., et al. Heavy Metals in the Environment, 2009.

<sup>47</sup> Leopold, K. et al. Los métodos para la determinación y especiación del mercurio en las aguas naturales, 2010.

<sup>48</sup> Wang, L.K., et al. Heavy Metals in the Environment, 2009.



## BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera*

Actualmente, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda una dosis máxima de metilmercurio de  $1.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  por semana; mientras que la EPA y el Consejo Nacional de Investigación (NRC) toman como referencia una dosis de  $0.1 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  de peso corporal de un adulto y por día<sup>49</sup>. La Directiva Europea de aguas clasifica el mercurio y sus compuestos como sustancias de riesgo e indica como valores máximos permitidos  $0.07 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  en aguas superficiales.

Para la eliminación de metales pesados de disoluciones acuosas, así como para la eliminación de compuestos orgánicos, se han aplicado tecnologías como la precipitación química, procesos de oxidación/reducción, separación sólido-líquido, tecnologías de membrana o procesos de intercambio iónico<sup>50</sup>. Una de las nuevas tecnologías para la eliminación de metales pesados es la biosorción.

### 5.12. CADMIO, PLOMO Y COBRE

El cadmio es un metal de color blanco plateado, blando y dúctil y que tiene una presión de vapor relativamente elevada. Se encuentra casi siempre como catión divalente, puede aparecer asociado a minas de zinc, por presentar una química similar a este metal, y aparece también en depósitos naturales o minas que contienen otros elementos. Su distribución en la corteza terrestre no es uniforme y la media de concentración se sitúa entre  $0.15$  y  $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Se encuentra en la naturaleza formando compuestos inorgánicos y acompañado por agentes quelatantes naturales; los compuestos orgánicos de cadmio son extremadamente inestables y no se detectan en el medioambiente<sup>51</sup>.

Su principal uso es en galvanizados, pigmentos de pintura, plásticos, baterías y recubrimientos. La contaminación por cadmio en aguas naturales deriva principalmente de la industria de galvanizado, así como de su uso en baterías.

<sup>49</sup> Leopold, K. et al. Los métodos para la determinación y especiación del mercurio en las aguas naturales, 2010.

<sup>50</sup> Fu, F.L., Wang Q. La eliminación de los iones de metales pesados de las aguas residuales, 2011.

<sup>51</sup> Mudhoo, A., Garg V.K., Wang S.B. Removal of heavy metals by biosorption. 2012.



## BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera*

Es un elemento altamente tóxico para el ser humano y se considera no esencial para los organismos vivos, pudiendo causar serios daños, afectando principalmente al hígado y los huesos. Fue clasificado por la EPA como un potencial agente carcinogénico. Está asociado a la enfermedad conocida como "Itai-Itai", que hace que los huesos se debiliten causando múltiples fracturas. La adsorción de cadmio tiene lugar principalmente a través del riñón e hígado, órganos donde mayoritariamente se acumula. La OMS recomienda una dosis máxima de 0.4-0.5 mg/semana y los máximos admisibles en agua se sitúan en 5  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>52</sup>.

El plomo es el metal pesado más común. Es un metal blando, que resiste la corrosión y con punto de fusión a 327°C. Es importante tener en cuenta sus niveles en aguas potables, ya que el plomo se ha usado universalmente en tuberías y en soldaduras en sistemas de distribución de aguas. Sin embargo, la principal fuente de contaminación del metal al medio ambiente derivaba de emisiones atmosféricas que provenían de los escapes de los vehículos. Con la introducción de la gasolina sin plomo, estas emisiones han descendido<sup>53</sup>.

En el medioambiente acuático se encuentra principalmente como plomo inorgánico divalente. Puede también existir como catión tetravalente y hay evidencias de que determinadas bacterias pueden llevar a cabo la metilación del plomo inorgánico, lo que significa que el plomo presente en suelos o sedimentos puede ser distribuido en el medioambiente en una forma más tóxica que el metal inorgánico<sup>54</sup>. La solubilidad de los compuestos de plomo es función del pH, dureza, salinidad y de la presencia de compuestos húmicos<sup>55</sup>.

El plomo se utiliza en acumuladores eléctricos y baterías, en construcción, en recubrimiento de cables y en munición; además también se empleaba como aditivo en gasolinas, pero esta aplicación ha ido decayendo paulatinamente. Tanto su presencia en tuberías o sistemas de distribución de agua, como su uso en

<sup>52</sup> Fu, F.L., Wang Q..Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. 2011.

<sup>53</sup> Ibid, p. 67.

<sup>54</sup> Wase, J. and Forster, C. F. Biosorbents for metal ions. 1997.

<sup>55</sup> Mudhoo, A. et al. Removal of heavy metals by biosorption. 2012.



## BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera*

diferentes actividades industriales, hace que pueda estar presente en agua potable, en alimentos o en el medioambiente.

La toxicidad de este metal es altamente conocida y estudiada. El plomo puede ser absorbido por inhalación, ingestión, contacto dérmico o transferido por la placenta. Los síntomas iniciales de intoxicación por plomo se relacionan con trastornos psíquicos, puesto que afecta al sistema nervioso central. Afecta también al hígado, riñón y sistema reproductivo. Uno de los problemas más destacados de este metal es su capacidad para sustituir el calcio de los huesos y acumularse permaneciendo como una reserva en el organismo<sup>56</sup>. Los niveles permitidos en la actualidad por la EPA y OMS para plomo en aguas potables se sitúan en 0.05 mg·L<sup>-1</sup> y 10 µg·L<sup>-1</sup>, respectivamente<sup>57</sup>.

Plomo, cadmio y mercurio son los tres metales pesados que constituyen un mayor riesgo para el ser humano y el medioambiente<sup>58</sup>.

El cobre es un metal rojo que aparece en la naturaleza principalmente como compuestos de Cu(I) y Cu(II), que presentan propiedades muy distintas al metal. Una de las mayores aplicaciones es su utilización como conductor, ya que, además de la plata, el cobre es el elemento que presenta mejores propiedades para conducir el calor y la electricidad. También se emplea cobre en tuberías, utensilios de cocina, en material químico y farmacéutico y como pigmento<sup>59</sup>.

Se trata de un elemento esencial para el ser humano, sin embargo, grandes dosis pueden resultar extremadamente tóxicas para los organismos vivos. Algunas evidencias indican que incluso puede ser un elemento carcinogénico. Puede causar daños a la fauna acuática y es fitotóxico<sup>60</sup>.

<sup>56</sup> Fu, F.L., Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. 2011.

<sup>57</sup> Ibid, p. 23.

<sup>58</sup> Volesky, B. and Holan, Z. R. Biosorption of heavy metals. 1995.

<sup>59</sup> Merian, E. and Clarkson, T. W. Los metales y sus compuestos en el medio: la aparición, el análisis y la relevancia biológica. 1991.

<sup>60</sup> Mudhoo, A. et al. Removal of heavy metals by biosorption. 2012.



Una acumulación de cobre en los tejidos puede dar lugar a la enfermedad de Wilson, que es hereditaria y que afecta al sistema neurológico, a la vista y al hígado<sup>61</sup>.

### 5.1.3. TÉCNICAS PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN AGUAS RESIDUALES

La creciente presencia de contaminantes en el medio acuático, así como su elevada toxicidad, previamente analizada, hace necesaria la búsqueda y el desarrollo de técnicas que permitan eliminar estos compuestos de forma eficaz, económica y que al mismo tiempo hagan posible alcanzar los estándares sanitarios permitidos.

### 5.1.4. TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES

Para la eliminación de metales pesados de disoluciones acuosas, así como para la eliminación de compuestos orgánicos, se han aplicado tecnologías como la precipitación química, procesos de oxidación/reducción, separación sólido-líquido, tecnologías de membrana o procesos de intercambio iónico<sup>62</sup>. Cada una de estas técnicas presenta diferentes ventajas y limitaciones que se exponen a continuación:

#### 5.1.4.1. Precipitación química

Es una técnica muy efectiva y ha sido la más aplicada para eliminación de metales al tratarse de una tecnología sencilla y barata. Las especies metálicas se precipitan variando el pH del medio, normalmente por adición de algún compuesto químico, quedando, así como residuo un lodo cargado con el metal que se puede separar por sedimentación o filtración. Las precipitaciones químicas más utilizadas son las que implican formación de un hidróxido o un sulfuro<sup>63</sup>.

---

<sup>61</sup> Ibid, p. 56.

<sup>62</sup> Fu, F.L., Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. 2011.

<sup>63</sup> Ibid, p. 44.



Las principales desventajas de esta técnica residen en la necesidad de añadir compuestos químicos de forma precisa, la eliminación del metal no siempre alcanza los mínimos requeridos por las regulaciones medioambientales y es necesario tratar el lodo cargado de metales obtenido como residuo<sup>64</sup>.

Esta tecnología también se ha desarrollado combinada con otras como la nanofiltración o el intercambio iónico para mejorar su eficacia<sup>65</sup>.

#### **5.1.4.2. Intercambio iónico**

Al igual que la precipitación química, el intercambio iónico es una técnica efectiva, presenta una elevada capacidad de tratamiento de residuos y una cinética rápida; sin embargo no es muy utilizada especialmente a gran escala por tratarse de una técnica cara<sup>66</sup>.

Los intercambiadores iónicos son sustancias granulares que presentan en su estructura molecular radicales ácidos o básicos que pueden intercambiar los iones negativos o positivos fijados en estos radicales por iones del mismo signo en la disolución en contacto con ellos. Las resinas iónicas son polímeros insolubles con grupos químicos activos. Las más comunes son las que tienen grupos ácido sulfónico (-SO<sub>3</sub>H) y grupos ácido carboxílico (-COOH)<sup>67</sup>.

En los últimos tiempos se han estudiado algunos minerales naturales, como las zeolitas, que actúan como buenos intercambiadores de metales pesados, sin embargo sus capacidades son inferiores a las resinas sintéticas y hasta ahora se aplican tan sólo a escala de laboratorio<sup>68</sup>.

#### **5.1.4.3. Filtración con membrana**

Diferentes tipos de membrana presentan elevadas capacidades de retención de metales pesados. La filtración es una técnica fácil a nivel operacional y requiere

<sup>64</sup> Lodeiro, P. et al. Aspectos termodinámicos y cinéticos en la biosorción de cadmio en materiales de bajo costo 2006.

<sup>65</sup> Fu, F.L., Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. 2011.

<sup>66</sup> Volesky, B. and Holan, Z. R. Biosorption of heavy metals. 1995.

<sup>67</sup> Wang, L. K. et al. Heavy Metals in the Environment. 2009.

<sup>68</sup> Fu, F.L., Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. 2011.



poco espacio. Dentro de la filtración con membrana se engloban la ultrafiltración, la ósmosis inversa, nanofiltración y la electrodiálisis<sup>69</sup>.

Los inconvenientes relacionados con las técnicas de membrana se asocian a la sensibilidad de la membrana, que puede dejar pasar diferentes tipos de compuestos. Además el proceso puede encarecerse, como en el caso de la ósmosis inversa, por la necesidad de utilizar presiones elevadas<sup>70</sup>.

#### **5.1.4.4. Coagulación y floculación**

La coagulación es la desestabilización de coloides por neutralización de las fuerzas que los mantienen separados, es una de las técnicas más utilizadas, pero principalmente se aplica a los coloides hidrófobos y a las partículas en suspensión. Por su parte, la floculación es la acción de los polímeros de formar puentes entre los flóculos (entendidos como agregación de sólidos en suspensión en el medio líquido) y unir las partículas en grandes aglomerados. Una vez separadas en grandes grupos se pueden eliminar del medio por filtración o flotación. Generalmente coagulación y floculación no permiten tratar todos los metales pesados en aguas residuales por lo que requieren de la utilización de otra técnica acoplada para completar el proceso<sup>71</sup>.

#### **5.1.4.5. Tratamiento electroquímico**

Los procesos electroquímicos implican la aplicación de un potencial para mover partículas iónicas cargadas en disolución de un medio a otro. Esta técnica conlleva la deposición de los iones metálicos en la superficie de un cátodo y permite recuperar los metales en su estado fundamental. Los metales pueden ser eliminados de forma selectiva variando el potencial eléctrico aplicado. No ha sido muy utilizada en procesos de eliminación de contaminantes por tratarse de un método caro. En algunos casos, con esta tecnología tampoco se alcanzan los

<sup>69</sup> Fu, F.L., Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. 2011

<sup>70</sup> Wang, L. K. et al. Heavy Metals in the Environment. 2009.

<sup>71</sup> Fu, F.L., Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. 2011



niveles requeridos de eliminación del metal debido a la baja velocidad de transferencia de masa de los iones que migran en disolución<sup>72</sup>.

#### **5.1.4.6. Oxidación-Reducción**

Las reacciones de oxidación-reducción se usan en el tratamiento de aguas contaminadas con metales para transformar un estado de oxidación del metal en el que está disuelto en otro estado de oxidación que permita su eliminación como precipitado. El control del pH es determinante para llevar a cabo esta técnica<sup>73</sup>.

### **5.1.5. ADSORCIÓN**

La palabra “sorci3n” se emplea para describir los diferentes mecanismos de captura de una sustancia por superficies externas de s3lidos y l3quidos, as3 como en la superficie interna de s3lidos porosos o l3quidos. Dependiendo del tipo de enlace, la sorci3n puede ser f3sica (fisisorci3n), qu3mica (quimisorci3n) o electrost3tica (intercambio i3nico). En la fisisorci3n no hay intercambio de electrones, el adsorbato o soluto es retenido d3bilmente en la superficie debido a las fuerzas de Van der Waals y se pueden formar varias capas con aproximadamente el mismo calor de adsorci3n, por lo tanto el proceso solo es estable a temperaturas menores de 150°C; por el contrario, la quimisorci3n implica un intercambio de electrones entre el soluto y sitios espec3ficos de la superficie del l3quido o s3lido, formando un enlace qu3mico m3s fuerte y estable a altas temperaturas<sup>74</sup>. Para terminar, el intercambio i3nico envuelve las fuerzas atractivas de Coulomb entre los iones de la soluci3n y los grupos funcionales del material adsorbente, estos 3ltimos presentan iones de la misma carga que los contenidos en la fase l3quida, de tal forma que son capaces de ser intercambiados<sup>75</sup>. Sin embargo, D3vila Guzm3n (2012)<sup>76</sup> afirma que la mayor parte

---

<sup>72</sup> Ibid, p. 97.

<sup>73</sup> Ibid, p. 42.

<sup>74</sup> Inglezakis & Pouloupoulos. Adsorci3n, intercambio i3nico y Cat3lisis. 2006.

<sup>75</sup> D3vila Guzm3n. Caracterizaci3n del proceso de biosorci3n de metales pesados mediante residuos s3lidos de caf3. 2012.

<sup>76</sup> Ibid, p. 76.



de los fenómenos de adsorción son combinaciones de las tres formas anteriormente mencionadas, por lo cual no es fácil distinguir entre ellos.

Es importante aclarar que el término “adsorción” hace referencia también a un fenómeno superficial, sin embargo los átomos, iones o moléculas (adsorbato o soluto) son retenidos solamente en materiales sólidos porosos (adsorbente), separándolos de la fase líquida o gaseosa en que se encontraban inicialmente<sup>77</sup>. En consecuencia, la capacidad de adsorción de un adsorbente está determinada por el número total de poros, su forma y tamaño<sup>78</sup>.

Uno de los materiales adsorbentes más utilizados es el carbón activado<sup>79</sup> siendo ideal debido a su gran área superficial por unidad de peso, la cual va de 300 a 1500 m<sup>2</sup>/g dependiendo del insumo con que se hizo el carbón activado. (Ver tabla 1). Existen además, otros materiales que se emplean comúnmente como adsorbentes como la sílica gel, la alumina, la zeolita, cuyas características se encuentran resumidas en la tabla 1. No obstante, se requiere de un alto costo de operación y mantenimiento, por lo cual en los últimos años se ha estado investigando procesos de adsorción con otros materiales de menor costo como el quitosan, la turba, las cenizas volantes<sup>80</sup> y los residuos lignocelulósicos.

<sup>77</sup> McCabe et al. Gorse: A Subject of Control in New Zealand. N. Z. Journal. 1993

<sup>78</sup> Inglezakis & Pouloupoulos, Adsorción, intercambio iónico y Catálisis 2006.

<sup>79</sup> Tchobanoglous, Burton, & Stensel. Residuos de Ingeniería: Tratamiento y reutilización. 2003

<sup>80</sup> Babel, S., & Kurniawan, T. A. Adsorbentes de bajo costo para los metales pesados absorción por el agua contaminada: una revisión. 2003.



**Tabla 1.** Características de los adsorbentes más comunes.

Adsorbente		Propiedades físicas		Ventajas		Desventajas	
Área superficial (m <sup>2</sup> /g)		Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )		Capacidad de adsorción (g/g)			
Carbón activado	300-1800	250-700	0.3-0.7	Costo Hidrofóbico	Dificultad y riesgo de incendio en la regeneración. No es selectivo.		
Alumina activada	200-400	700-930	0.1-0.33	Mayor capacidad de adsorción que las zeolitas	No tan efectivo en la remoción de trazas de agua presentes en gases		
Silica gel	300-850	700-820	0.35-0.50				
Zeolitas	600-700	580-680	0.21-0.36	Puede como por su estructura separar tanto por su polaridad	Menor capacidad de adsorción que muchos otros adsorbentes		

**Fuente.** Inglezakis & Pouloupoulos,2006; Modificada por autores, 2016.



### 5.1.6. BIOADSORCIÓN

La bioadsorción es una interacción física indirecta entre iones y componentes celulares ya sea de organismos vivos o muertos como microorganismos, hongos, levaduras, algas, residuos vegetales, entre otros<sup>81</sup>. Por lo tanto, el proceso de bioadsorción involucra una fase sólida (bioadsorbente) y una fase líquida (solvente, que es normalmente el agua) que contiene las especies disueltas que van a ser sorbidas (adsorbato, iones metálicos). Debido a la gran afinidad del adsorbente por las especies del adsorbato, este último es atraído hacia el sólido y enlazado por diferentes mecanismos. Este proceso continúa hasta que se establece un equilibrio entre el adsorbato disuelto y el adsorbato enlazado al sólido<sup>82</sup>.

La aplicación de esta tecnología se ha estudiado ampliamente como solución alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, siendo capaz de disminuir su concentración en disoluciones a niveles de ppb ( $\mu\text{g/L}$ ).

En los últimos años se ha diversificado la utilización de biomasa muerta o productos derivados de ella, como los residuos vegetales, ya que además de eliminar el problema de la toxicidad, presenta ventajas económicas, tanto de mantenimiento como evitando el suplemento de nutrientes<sup>83</sup>. Sin embargo, las aguas residuales contienen varios metales disueltos, lo que produce competitividad entre los iones por los sitios activos presentes en la estructura del bioadsorbente; no obstante, cada material es afín a diferentes iones y esta selectividad puede ser potenciada o modificada con determinados tratamientos.

<sup>81</sup> Muriithi G. L. The water Hyacinth *Eichhornia crassipes* (mart) solms as a biosorbent for cadmium (II) and lead (II) removal: kinetic and equilibrium 2010.

<sup>82</sup> Andrango Caizapanta. Estudio Isotérmico de Biosorción de cromo y cadmio en solución acuosa utilizando residuos de césped.2011.

<sup>83</sup> Cañizares-Villanueva R. Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. 2000.



### 5.1.6.1. Factores que afectan al proceso de bioadsorción

#### 5.1.6.1.1. Influencia del Potencial de Hidrogeno pH

El pH es uno de los factores clave en el proceso de adsorción. Describir el efecto del pH requiere entender la química en disolución. Existen tres maneras básicas en las que este parámetro influye en la capacidad de adsorción: el estado de los sitios activos de la biomasa varía con el pH del medio, haciéndolos más o menos disponibles para el enlace con los compuestos en disolución; valores de pH extremos pueden dañar la estructura del material y es fundamental la especiación y solubilidad del metal en disolución que son factores que dependen directamente del pH<sup>84</sup>.

Entre los grupos funcionales más comunes en los adsorbentes naturales se encuentran grupos como el hidroxilo, carboxilo, sulfhidrilo, etc. Un cambio en el pH de la disolución cambia el estado de estos grupos y modifica la interacción con los contaminantes. Así, a pH bajos la superficie del material puede cargarse positivamente inhibiendo la aproximación de los cationes metálicos u otros contaminantes cargados positivamente; por el contrario, valores de pH muy altos suelen dar problemas de precipitación del metal. Por lo tanto, de forma general, pHs entre 4-7 suelen ser los óptimos para llevar a cabo el proceso de adsorción, especialmente con cationes metálicos, en ese intervalo la desprotonación de los grupos funcionales favorece la atracción de las especies con carga positiva; mientras que la adsorción de aniones suele ser más favorable a pH bajos<sup>85</sup>.

#### 5.1.6.1.2. Temperatura

Este parámetro puede afectar directamente a la interacción entre soluto y adsorbente, si bien en un rango limitado de temperaturas la adsorción puede mantenerse constante. Este hecho indica que, en parte, la eliminación de un

<sup>84</sup> Chojnacka, K. Biosorption and bioaccumulation - the prospects for practical applications, 2010.

<sup>85</sup> Liu, Y., Wang J. Fundamentos y aplicaciones de biosorción isoterma, Cinética y Termodinámica, 2009.



compuesto determinado puede estar regida por un mecanismo de intercambio iónico, ya que este proceso no se ve afectado por la temperatura<sup>86</sup>.

El estudio de la temperatura se lleva a cabo a través de las isotermas de adsorción. Estos modelos permiten obtener las constantes de equilibrio adsorbente/adsorbato y esto es clave para determinar otros datos de la termodinámica del proceso, como la entalpía, entropía o energía libre.

De forma general, se ha demostrado que la influencia de la temperatura en la capacidad de adsorción es baja y el proceso apenas varía al variar este parámetro. En algunos casos se han registrado mejores capacidades de adsorción con el aumento de la temperatura, lo que sugiere un proceso endotérmico; esta tendencia indica que al aumentar este parámetro hay un mayor número de sitios activos que participan en el enlace con el compuesto o que existe una mayor afinidad adsorbente/adsorbato. Sin embargo, en otros casos, al aumentar la temperatura se puede ver afectada o dañada la estructura del material, disminuyendo la adsorción<sup>87</sup>.

#### **5.1.6.1.3. Tiempo de contacto**

En todo estudio de bioadsorción es necesario conocer el tiempo de equilibrio entre el soluto y el material. Este tiempo necesario para que se complete el proceso de adsorción es determinante para desarrollar los demás estudios y optimizar el proceso, además del interés que tiene en sí mismo el conocimiento de la cinética del proceso de eliminación. El tiempo de reacción también puede depender de otras condiciones experimentales, como la concentración del contaminante o la dosis de adsorbente.

---

<sup>86</sup> Ibid, p. 33.

<sup>87</sup> Ibid, p. 53.



Habitualmente, los procesos de adsorción metal o compuesto orgánico/biomasa tienen tiempos cortos, llegándose al equilibrio en unas pocas horas<sup>88</sup> e incluso minutos<sup>89</sup>.

#### 5.1.6.1.4. Características del adsorbente

Uno de los factores clave en los procesos de adsorción son las características físicas y químicas del propio adsorbente. Por un lado, el tipo y cantidad de grupos funcionales que presenta en su estructura, la disponibilidad de los mismos, el estado químico en el que se encuentran y la afinidad entre el sitio y el metal<sup>90</sup>.

Por otro lado, las características físicas del material como el tamaño de poro y partícula, así como la etapa de crecimiento alcanzado en el momento de recolectar la biomasa para su uso como adsorbente o diferentes orígenes del mismo material pueden afectar también al proceso de adsorción. Con el fin de determinar estas características del material (estructura y composición) se llevan a cabo los estudios de caracterización de la biomasa.

El pretratamiento del material es clave para su posterior utilización, pudiendo afectar a las capacidades de enlace<sup>91</sup>. En algunos casos se trata de un pretratamiento sencillo (lavado, secado y triturado); pero en otros casos se aplican pequeñas modificaciones químicas de la biomasa con el fin de mejorar su capacidad de eliminación del compuesto. En ocasiones, la etapa de pretratamiento puede incluir un proceso de inmovilización del material sobre un soporte sólido o encapsulándolo en una matriz inorgánica. Tanto algunas modificaciones químicas, como la inmovilización de la biomasa, se llevan a cabo para mejorar las capacidades mecánicas del material, especialmente en procesos en continuo y si es posible, aumentar su eficacia como adsorbente.

<sup>88</sup> Carro, L., et al. Eliminación del mercurio: un estudio físico-química de la interacción de metal con materiales naturales, 2009.

<sup>89</sup> Herrero, R., et al. La eficiencia del alga roja *Mastocarpus stellatus* para la remediación de la contaminación de cadmio.2008.

<sup>90</sup> Volesky, B. Sorption and biosorption. 2003.

<sup>91</sup> Gadd, G.M. Biosorción: revisión crítica de la razón científica, la importancia del medio ambiente y la importancia para el tratamiento de la contaminación.2009.

### **5.1.6.2. ETAPAS DEL PROCESO DE BIOADSORCIÓN**

Un estudio completo de bioadsorción se compone de los siguientes procesos:

- Muestreo de materiales inicial que permita seleccionar aquellos que presenten mejores eficacias de eliminación del contaminante
- Caracterización de los materiales utilizados. Determinación de los principales grupos funcionales presentes en su estructura y su posible implicación en el proceso de eliminación del metal o compuesto orgánico
- Estudio y control de los parámetros físico-químicos que intervienen en el proceso:
  - El tiempo de equilibrio: estudios cinéticos y empleo de modelos que ajusten los resultados y permitan interpretar de forma clara los datos experimentales
  - pH del medio. Se selecciona el pH al cual la eliminación es óptima
  - Fuerza iónica. Se estudia la influencia que la salinidad de la disolución tiene sobre la eliminación del compuesto
  - Temperatura y concentración. Estudio del equilibrio y modelización a través de las isotermas de adsorción
- Competición con otras especies en el medio; metales pesados o compuestos orgánicos.
- Estudio del proceso en continuo
- Desorción y regeneración del material utilizado
- Modificaciones e inmovilizaciones de la biomasa que mejoren el proceso, tanto desde el punto de vista de la mejora de la estabilidad mecánica del material como para obtener mayores capacidades de adsorción.

A lo largo del tiempo se ha estudiado la capacidad de diferentes tipos de materiales para eliminación del mercurio, con el fin de establecer una relación entre la capacidad de adsorción del metal y la composición del propio material en las condiciones de trabajo. Los estudios de adsorción y de desorción dan



información del mecanismo implicado en el proceso de bioadsorción, cómo es la unión entre el metal o compuesto orgánico con el bioadsorbente<sup>92</sup>.

### 5.1.6.3. TIPOS DE PROCESOS Y EQUIPOS

En la bioadsorción generalmente se utilizan dos técnicas de laboratorio: Unidades por lotes (experimentos en reactores Batch) y columnas de lecho fijo. Las primeras corresponden a una operación discontinua, mientras las segundas a un sistema de funcionamiento continuo.

#### 5.1.6.3.1. Bioadsorción en discontinuo

Llamada también operación por lotes o ensayos tipo Reactor Batch, la bioadsorción en discontinuo consiste en la adición del adsorbente a un volumen determinado de solución que es agitada posteriormente hasta alcanzar el equilibrio entre la fase líquida y la fase sólida, con el fin de analizar el comportamiento del adsorbente en la solución problema<sup>93</sup>. Una vez retenido, el metal contenido en el bioadsorbente, es retirado mediante un sistema de separación sólido-líquido; así mismo dicho metal puede ser recuperado mediante el proceso de desorción o dispuesto apropiadamente, dependiendo del costo del material adsorbente, el valor económico del metal retenido y su toxicidad<sup>94</sup>.

Este tipo de experimentos permiten obtener los valores óptimos de los distintos parámetros que influyen en el proceso de adsorción a partir de los cuales es posible estudiar las condiciones aplicables a un proceso real mediante ensayos en continuo. Además tienen las ventajas de obtener resultados con rapidez y requerir de bajas cantidades tanto de adsorbato como de bioadsorbente<sup>95</sup>.

<sup>92</sup> Gavrilesco, M. La eliminación de los metales pesados del medio ambiente mediante la biosorción. 2004.

<sup>93</sup> Perry, R. H. *Manual del ingeniero químico. Sexta edición*. Mexico: McGraw-Hill. 2001.

<sup>94</sup> García Ríos, M. Biosorción de cadmio con raso de uva. Aproximación a la monitorización del proceso mediante sensores químicos. Cataluña: Tesis de grado de la Universidad Politécnica de Cataluña. 2008

<sup>95</sup> Triviño L., Hernández C. Evaluación de la capacidad de bioadsorción de Pb (ii) y Cd (ii) presentes en soluciones sintéticas independientes empleando retamo espinoso (*Ulex europaeus*) como adsorbente. 2016



### 5.1.7. BIOADSORVENTES

Una gran cantidad de los materiales naturales presentan elevada afinidad por los metales pesados y por otros contaminantes orgánicos, por lo tanto, son muchos los tipos de biomasa potencialmente disponibles para estudios de bioadsorción. Se ha comprobado que la capacidad para la eliminación contaminante de los biomateriales se relaciona con la gran variedad de grupos funcionales presentes en su estructura. La composición de estos grupos no varía significativamente entre especies diferentes de la misma familia<sup>96</sup>. Entre los materiales más utilizados en procesos de adsorción se encuentran las algas, lignina, materiales con taninos, quitosano y quitina, xantato, zeolitas, musgo, madera, hojas de árbol, hongos, etc<sup>97</sup>.

#### 5.1.7.1. Material con lignina

Se engloban en este apartado diversos tipos de plantas y restos de vegetales terrestres. Materiales como el helecho, el musgo, hojas de arbustos y árboles, etc. presentan un elevado contenido en lignina lo que hace que sean prometedores adsorbentes en estudios de bioadsorción.

La lignina es el polímero natural más abundante después de la celulosa. Se trata de una molécula polifenólica que está presente en la pared celular de las plantas y se forma a partir de la polimerización enzimática de tres monómeros, alcohol coniferílico, alcohol sinapílico y alcohol p-cumarílico. La estructura resultante (ver Figura 1) es una macromolécula compleja con diferentes tipos de grupos funcionales y de posibles posiciones de enlace en su estructura<sup>98</sup>. La función principal de la lignina es consolidar las fibras de celulosa en las plantas<sup>99</sup>

La lignina se extrae como producto de desecho de la industria del papel. Se generan entre 40 y 50 millones de toneladas/año de este material en su mayoría

<sup>96</sup> Farooq, U. et al. Biosorción de iones de metales pesados utilizando biosorbentes a base de trigo 2010.

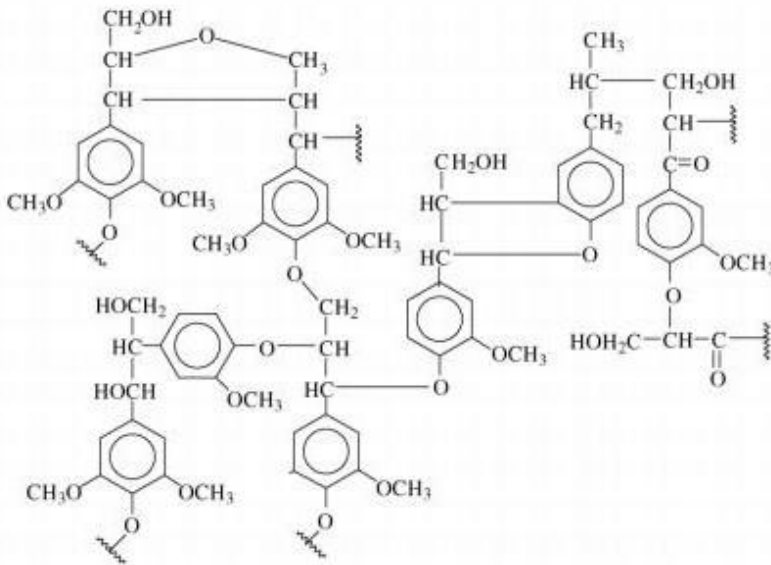
<sup>97</sup> Agarwal, H. et al. Eliminación del mercurio de las aguas residuales. El uso de adsorbentes verdes. Una revisión .2010).

<sup>98</sup> Guo, X. et al., 2008; Tejado, A. et al. La adsorción de iones metálicos sobre la lignina 2007.

<sup>99</sup> Suhas et al. Lignina adsorbente natural de carbón activado: Una revisión .2007.

como producto de desecho no comercializado<sup>100</sup>. Una parte de la lignina producida se consume como fuel, otra posible aplicación es su uso como precursora de carbones activos<sup>101</sup>. La elevada capacidad de adsorción de la lignina se debe a los fenoles y otros grupos funcionales como aldehídos, cetonas, hidróxido, presentes en la superficie del material<sup>102</sup>, aunque es complicado definir su estructura puesto que las ligninas presentan cierta variación en su composición química.

Varios estudios han demostrado la capacidad de eliminación de la lignina con metales pesados (cobre, plomo, cadmio) y con colorantes u otros compuestos orgánicos (pesticidas, fenoles, surfactantes, etc.). Otros trabajos se han centrado en materiales lignocelulósicos, siendo complicado relacionar las capacidades de adsorción con la cantidad de lignina o celulosa presente en los mismos<sup>103</sup>.



**Figura 1.** Estructura química de la Lignina. **Fuente.** Guo, X. et al., 2008.

### 5.1.7.2. Taninos

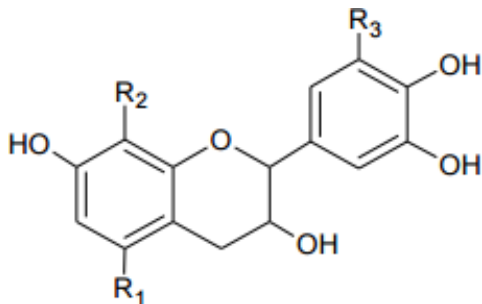
<sup>100</sup> Bailey, S. E. et al., 1999; Suhas et al. Una revisión de los absorbentes potencialmente de bajo costo para los metales pesados. 2007.

<sup>101</sup> Ibid, p. 45.

<sup>102</sup> Dupont, L. et al., 2003; Suhas et al. Los iones metálicos de unión sobre un sustrato lignocelulósico extraída del salvado de trigo. 2007

<sup>103</sup> Ibid, p. 89.

El tanino es un polímero natural, abundante y económico<sup>104</sup>. Ciertos tipos de materiales como la corteza de árbol, el café o el té poseen taninos en su estructura<sup>105</sup>. Estos materiales son potenciales adsorbentes de metales pesados debido a la presencia de grupos polihidroxílicos y polifenólicos. En la Figura 2 se muestra un posible modelo de la estructura condensada de la molécula de tanino.



**Figura 2.** Estructura química de la Molécula de Tanino. **Fuente.** Ogata, T., Nakano Y; 2005.

### 5.1.7.3. Otros materiales

Además de los materiales expuestos anteriormente, existen artículos de revisión en el ámbito de la bioadsorción que clasifican algunos de los materiales más utilizados en dos grandes grupos: residuos de actividades agrícolas y residuos industriales y municipales<sup>106</sup>.

**Tabla 2.** Algunos adsorbentes utilizados en estudios de bioadsorción.

<b>Adsorbente Derivados De Residuos Agrícolas</b>	<b>Adsorbentes Derivados De Residuos Industriales Y Municipales</b>
Arroz y trigo	Cenizas
Aserrín	Escorias, lodos y polvos de la industria del

<sup>104</sup> Ogata, T., Nakano Y. Mecanismos de recuperación de oro a partir de soluciones acuosas utilizando un adsorbente de gel novela tanino sintetizados a partir de tanino condensado naturales, 2005.

<sup>105</sup> Bailey, S.E., et al. Una revisión de los absorbentes potencialmente de bajo costo para los metales pesados. 1999.

<sup>106</sup> Bhatnagar, A. Utilización de materiales de desecho agro-industriales y municipales como adsorbentes potenciales para el tratamiento agua, Una revisión. 2010.



## BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera*

Corteza de árbol	acero
Té y café	Lodos rojos del aluminio
Coco	Industria de fertilizantes
Cacahuete	Industria del cuero
Cascara de frutas o vegetales	Industria del papel Lodos
Conchas	
Tallos y semillas	

**Fuente.** Bhatnagar, A; 2010.

A lo largo de los últimos años se han desarrollado numerosos estudios para comprobar la capacidad de adsorción en procesos de eliminación de contaminantes. En la Tabla 3 se reflejan algunos datos de capacidades de adsorción, obtenidas en trabajos previos, para el mercurio y diferentes tipos de adsorbentes.

**Tabla 3.** Capacidades de adsorción de Hg con diferentes tipos de materiales.

Material	Bioadsorción (ppm)
Helechos <i>Arborecenses</i>	26.5 mg/g
corteza de eucalipto ( <i>eucalyptus camaldulensis</i> )	33.11mg/g
Guayaba Manzana ( <i>Psidium guajava</i> )	3.364 mg/g
madera de Papaya	70.8 mg/g
cascara de semilla de Ceiba ( <i>Ceiba Pentandra</i> )	25.88 mg/g

**Fuente.** Tejada, C., Villabona, Á., & Ruiz, V; 2012.

### 5.1.8. MODELIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE EQUILIBRIO

El principal objetivo de los estudios de adsorción es conocer el mecanismo que tiene lugar y de qué forma las condiciones del medio pueden hacer variar la interacción de los contaminantes con el adsorbente con el fin de optimizar los parámetros del proceso. El primer paso hacia este objetivo es cuantificar la capacidad del material de eliminar compuestos en disolución y esto se obtiene aplicando los modelos que permiten describir el proceso y ajusten los datos bajo diferentes condiciones experimentales. Los modelos son relaciones matemáticas compuestas por un número limitado de parámetros ajustables los cuales dan una buena descripción del comportamiento experimental bajo distintas condiciones



operacionales<sup>107</sup>. Estos modelos matemáticos se utilizan principalmente para obtener una descripción cuantitativa de los resultados experimentales y la determinación de los parámetros permite comparar las capacidades máximas de adsorción de cada uno de los adsorbentes probados. Los parámetros de las ecuaciones y las suposiciones termodinámicas de las isothermas deben de ser capaces de predecir la eliminación del contaminante, describiendo el mecanismo de adsorción y la influencia de las variables que controlan el proceso de eliminación como son el pH, la fuerza iónica o la presencia de otros contaminantes; pero la eliminación de los contaminantes sobre materiales naturales es un proceso complejo que implica, como ya se ha descrito, diferentes mecanismos que tienen lugar simultáneamente y en muchos casos, se alejan de las condiciones ideales y suposiciones que se describen en los modelos de isothermas. A pesar de esto, el uso de estos modelos está muy extendido ya que permiten ajustar los datos experimentales de forma sencilla e incorporan constantes fácilmente interpretables que pueden servir para comparar el proceso de eliminación entre diferentes contaminantes y adsorbentes.

La capacidad de adsorción es el parámetro más importante de un adsorbente y se mide en función de la cantidad de contaminante que puede retener, cuantificando la cantidad de la especie adsorbida por unidad de masa de adsorbente ( $Q_i$ ):

---

$V$  = volumen de disolución de contaminante que se pone en contacto con la biomasa

$C_i$  = concentración inicial de contaminante

$C_e$  = concentración en el equilibrio

$m$  = masa de adsorbente seco

---

<sup>107</sup> Mudhoo, A. et al. Removal of heavy metals by biosorption. 2012.



Esta variable está influida por una serie de propiedades como el tamaño y distribución de poros y partículas del adsorbente, superficie específica, capacidad de intercambio iónico, pH, grupos funcionales en la superficie o la temperatura.

En el equilibrio de adsorción existe una distribución del adsorbente entre la disolución y la superficie del adsorbato; las concentraciones en el equilibrio son función de la temperatura, por ello, las relaciones de equilibrio de adsorción se expresan a través de las isothermas. Así, las isothermas de adsorción se definen como las representaciones de la cantidad de especie adsorbida ( $Q_e$ ) frente a la concentración en el equilibrio de dicha especie en disolución,  $C_e$ , y permiten describir los resultados bajo condiciones experimentales concretas<sup>108</sup>.

Algunos de los modelos más empleados en los estudios de adsorción incluyen dos, tres o incluso cuatro parámetros para modelizar los datos de una isoterma; entre estos modelos se encuentran el de Langmuir, el de Freundlich y el de Langmuir-Freundlich. Estos modelos se aplican con frecuencia porque son simples, tienen sentido físico y son fácilmente interpretables<sup>109</sup>.

### **5.1.9. ÁRBOL DE LA *Moringa oleífera***

La *Moringa oleífera* es un árbol de crecimiento acelerado, de contextura pequeño que alcanza una altura aproximada 12 m, se aprecia primordialmente por sus frutas, hojas, flores, raíces, todas comestibles, y por sus semillas oleaginosas. Este cultivo puede ser propagado por medio de semillas o por reproducción asexual (estacas), con características de un suelo pobre, soportando largos períodos de sequía (400 mm) y crece bien en condiciones áridas y semiáridas.<sup>110</sup>

<sup>108</sup> Febrianto, J. et al., 2009; Volesky, B. Equilibrio y estudios cinéticos de adsorción de metales pesados utilizando biosorbente: Un resumen de estudios recientes. 2003.

<sup>109</sup> Mudhoo, A. et al. Removal of heavy metals by biosorption. 2012.

<sup>110</sup> Herreño N. et al, evaluación de variables fisiológicas para la adaptación de moringa (*moringa oleífera* lam.) en fase de vivero bajo diferentes condiciones de luz en el municipio de ricaurte, vereda el callejon (cundinamarca). 2013



### 5.1.9.1. Taxonomía

En la tabla 4 se indica la clasificación taxonómica de la *Moringa oleífera*, la cual se considera que por sus propiedades tiene un alto poder nutricional<sup>111</sup> y a esto se le adiciona el contenido de compuestos que ayudan a descontaminación de los cuerpos de agua.

**Tabla 4.** Taxonomía De La Especie Vegetal *Moringa oleífera*.

<b>REINO</b>	Planta
<b>SUB-REINO</b>	<i>Embriophyta</i>
<b>DIVISIÓN</b>	<i>Anthophyta</i>
<b>CLASE</b>	<i>Dicotiledónea</i>
<b>ORDEN</b>	<i>Rhoedales</i>
<b>FAMILIA</b>	<i>Moringáceae</i>
<b>GENERO</b>	<i>Moringa</i>
<b>NOMBRES COMUNES</b>	Terebinto, Marango, Moringa, Morango, Perlas, Sasafrás
<b>ESPECIES</b>	<i>Arbórea, concanensis, drocanesis, drouhardii, hildebrandtii, pygmaeae, peregrina, ovalaifolia, rospoliana, stenopetala, riviae, oleífera y borziana.</i>

**Fuente.** Herreño Néstor, 2013.

### 5.1.9.2. Características morfológicas

En la Tabla 5. Se presentan las características morfológicas de la *Moringa oleífera*. Este árbol crece bien en alturas que van desde 0 msnm hasta los 1200 msnm y se desarrolla en temperaturas altas, es decir que su adaptación seda en los diversos pisos térmicos<sup>112</sup>





**Tabla 5.** Características morfológicas de la *Moringa oleífera*.

<b>CARACTERÍSTICA MORFOLÓGICA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
	La raíz principal mide varios metros y es carnosa en forma de rábano. Es pivotante y

<sup>111</sup> Ibid, p. 4.

<sup>112</sup> Ibid, p. 7.

## BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera*

 <p><b>Figura 3.</b>Raíz de la <i>Moringa oleífera</i>. <b>Fuente.</b> Google, 2016.</p>	<p>globosa lo que le brinda a la planta cierta resistencia a la sequía en periodos prolongados. Cuando se le hacen cortes, produce una goma color rojizo parduzco.</p>
 <p><b>Figura 4.</b>Hojas de la <i>Moringa oleífera</i>. <b>Fuente.</b> Google, 2016.</p>	<p>Las hojas son compuestas de unos 20 cm de largo, con hojuelas delgadas, oblongas u ovaladas de 1 a 2 cm de largo y de color verde claro; tienen cualidades nutritivas sobresalientes. Que están entre las mejores de todos los vegetales perennes. El contenido de proteína es del 27%, además tienen cantidades significativas de calcio, hierro y fósforo, así como vitamina A y C.</p>
 <p><b>Figura 5.</b>Flores de la <i>Moringa oleífera</i>. <b>Fuente.</b> Google, 2016.</p>	<p>Las flores son de color crema, numerosas fragantes y bisexuales. Miden 1 a 1.5 cm de largo. Estas se encuentran agrupadas y están compuestas por sépalos lineales a lineal-oblongo de 9 a 13 mm de largo. Los pétalos son un poco más grandes que los sépalos.</p>
 <p><b>Figura 6.</b>Tallo de la <i>Moringa oleífera</i>. <b>Fuente.</b> Google, 2016.</p>	<p>La corteza es blanquecina, el tronco generalmente espeso e irregular en tamaño y forma y la copa pequeña y densa, rara vez sobrepasa los 10 metros de altura.</p>

**BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera***



**Figura 7.** Fruto de la *Moringa oleífera*.  
**Fuente.** Google, 2016.

Las frutas son una capsulas de color pálido, de tres lados, lineares y pendientes, con surcos longitudinales usualmente de 20<sup>a</sup> 40 cm de largo, y de 2 a 2.5 cm de ancho. Si se corta transversalmente se observa una Sección triangular con varias semillas dispuestas a lo largo.



**Figura 8.** Semilla de la de la *Moringa oleífera*.  
**Fuente.** Google, 2016.

Las semillas son carnosas cubiertas por una cascara fina de color café. Poseen tres alas, o semillas aladas de 2.5 a 3mm de largo, al quitar la cascara se obtiene el endospermo que es blanquecino y muy oleaginoso.

**Fuente.** Herreño Néstor, 2013.

**5.1.9.3. Usos**

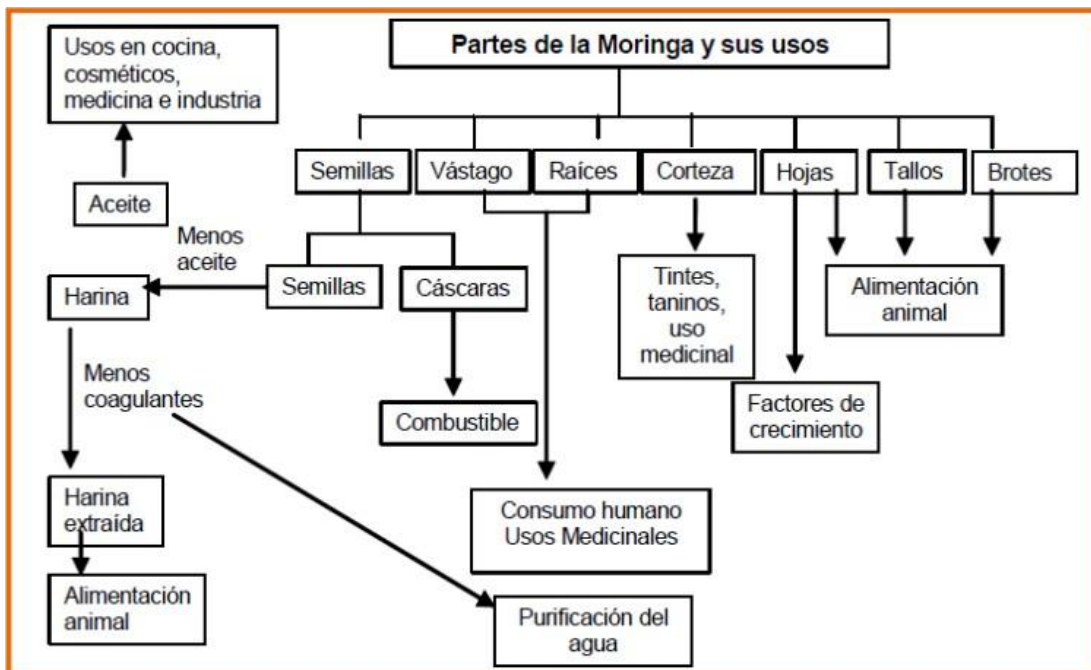
La *Moringa oleífera* se caracteriza por ser uno de los árboles más útiles para zonas propensas de sequía. El uso principal que se le otorga a esta especie es en las cocinas y en huertas caseras, debido a sus hojas suculentas para preparación de sopas, salsas o ensaladas. Las vainas son a menudo cocidas y consumidas como arvejas. La raíz tiene un sabor al rábano picante, una comida popular en el este de África. Las flores se pueden comer en ensaladas o usarse como té, éstas producen buenas cantidades de calcio y potasio, también son muy usadas en apicultura. De igual manera varias partes del *Moringa oleífera* son usadas en medicina como diurético, laxante, bactericida, anti- escorbútico y anti-inflamatorio.

## BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera*

De la semilla se extrae el aceite, el cual se encuentra en un 25 -30 % utilizado en industria farmacéutica, de alimentos, cosmética y como lubricante de maquinaria industrial y mecánica de precisión (relojes, etc.)

Estudio de la *Moringa* como purificador de agua

La utilidad de especie en un estudio referente a las propiedades que presenta la semilla de *Moringa oleífera* radica como purificadora de aguas de ríos. Según algunas investigaciones realizadas, ésta semilla posee una proteína llamada pterygospermina, un compuesto bactericida y fungicida. Su efecto floculante es por diferencia de cargas eléctricas que se establece entre las partículas que se encuentran en suspensión en el agua y el extracto de la semilla de *Moringa oleífera*.



**Figura 9.** Usos potenciales de diferentes partes de la planta *Moringa oleífera* en la industria y producción de alimentos. **Fuente.** Chojnacka, K., 2010.



La moringa como material bioadsorbente

La *Moringa oleífera* ha sido utilizada como bioadsorbente para eliminar diferentes metales, algunas de sus partes como la corteza que fue utilizada para la eliminación del Ni (III), cuya capacidad máxima de bioadsorción fue de 30,38mg/g, con un pH óptimo de la solución de 6, una concentración de biomasa de 0,4g y un tiempo de contacto de 60min. Otra parte de la planta que se utilizó para remover este mismo metal fueron las hojas de la *Moringa oleífera* cuya capacidad máxima de adsorción fue de 163,88mg/g, con un pH de 6, a una temperatura de 49,84°C, en un tiempo de contacto de 50 min. <sup>113</sup>

Otro estudio realizado por García, B. et al. 2012<sup>114</sup>. Con la cascara y el carbón activo de la *Moringa oleífera* como bioadsorbente para la eliminación de Ni, Cu y Cd de agua sintética, demostró que los porcentajes de eliminación superiores al 93%, 96% y 95% para Ni, Cu y Cd, respectivamente, estudiando variables como el tiempo de contacto, dosis de adsorbente, pH y temperatura.

Las vainas de *Moringa oleífera* han sido utilizadas para la remoción de Manganeseo (II)<sup>115</sup>, donde los resultados mostraron que este bioadsorbente contienen grupos funcionales y un perfil morfológico adecuado para la retención de iones metálicos, en este estudio se tuvo en cuenta el efecto del tiempo de contacto (5 a 90 min), la dosis de biomasa (0,25 g), la concentración de metal (4.0 mg/L), el volumen de la solución de ensayo (25 mL) y el pH de 7; demostrando que el tiempo de contacto óptimo fue de 5 minutos y el porcentaje de remoción fue de 79%.

---

<sup>113</sup> Harikishore, et al. Biosorption of Ni (II) from aqueous phase by *Moringa oleifera* bark, a low cost biosorbent. Desalination. 2011.

<sup>114</sup> García, B. et al. Estudio de la descontaminación de efluentes líquidos con elevada concentración de metales pesados mediante bioadsorbentes de *moringa oleífera*. 2012.

<sup>115</sup> Rodríguez, M. et al. Un estudio de la remoción de manganeseo (II) a partir de sistemas acuosos usando cápsulas de *moringa oleífera* como bioadsorbente. Cenic ciencias biológicas.2015.

## 5.2. MARCO GEOGRÁFICO

El presente estudio se realizó en el laboratorio de química de la universidad de Cundinamarca en la ciudad de Girardot–Cundinamarca en la dirección: Cra. 19 # 24-209 B/ Gaitán, con las coordenadas: latitud: 4°18' 38" N longitud: 74° 48' 38" W<sup>116</sup>. Girardot se encuentra a 326 m.s.n.m., presenta una temperatura promedio anual de 33°C y una humedad relativa de <sup>73</sup>.

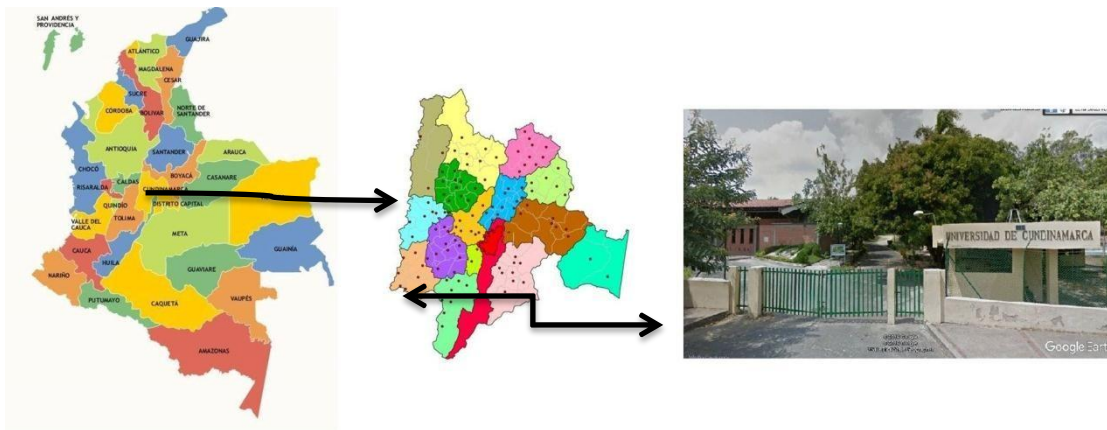


Figura 10. Ubicación área de estudio. Fuente: Autores, 2016

116 Pixelis Maps, 2016. Disponible en <http://www.maps.pixelis.es/> Recuperado el 24 de junio de 2016.



### 5.3. MARCO LEGAL

A partir de la ley 2811 de 1974 en Colombia, comienza a darse importancia a la conservación de los recursos naturales; con el pasar de los años se ha creado normatividad cada vez más específica y estricta a temas de contaminación, en este caso contaminación a fuentes hídricas por metales pesados, como se observa en la tabla 6.

Tabla 6. Marco Legal referente a la contaminación hídrica en Colombia.

NORMATIVIDAD	ATR	CONTENIDO
Directiva del Consejo 82/176/CEE, de 22 de Marzo de 1982, UNIÓN EUROPEA		La presente Directiva completa las disposiciones sobre vertidos de sustancias peligrosas en el medio acuático dentro de la Unión Europea.
La Constitución Nacional de Colombia de 1991	79,80, 366	Todo ser humano tiene derecho a gozar de un ambiente sano, y es función del Estado garantizar dicho derecho, así como el mejoramiento de la calidad de vida de la población, dando solución a las Necesidades básicas insatisfechas.
<b>Ley 9 de 1979</b> “por el cual se dictan Medidas Sanitarias”	1 – 9 10 – 5, 17 564 – 566 577 – 587	Usos del agua Residuos líquidos Disposiciones generales de vigilancia y control. Sanciones
<b>Decreto 2811 de 1974</b> “Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente”	1 – 3  134 – 136	Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.  Prevención y control de la contaminación.
<b>Decreto 1575 de 2010</b> “por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano”	8, 16	Vigilancia de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua Información de sustancias potencialmente tóxicas
<b>Decreto 3930 de 2010</b>	9, 16	usos del agua y residuos líquidos



**BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE  
VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera***

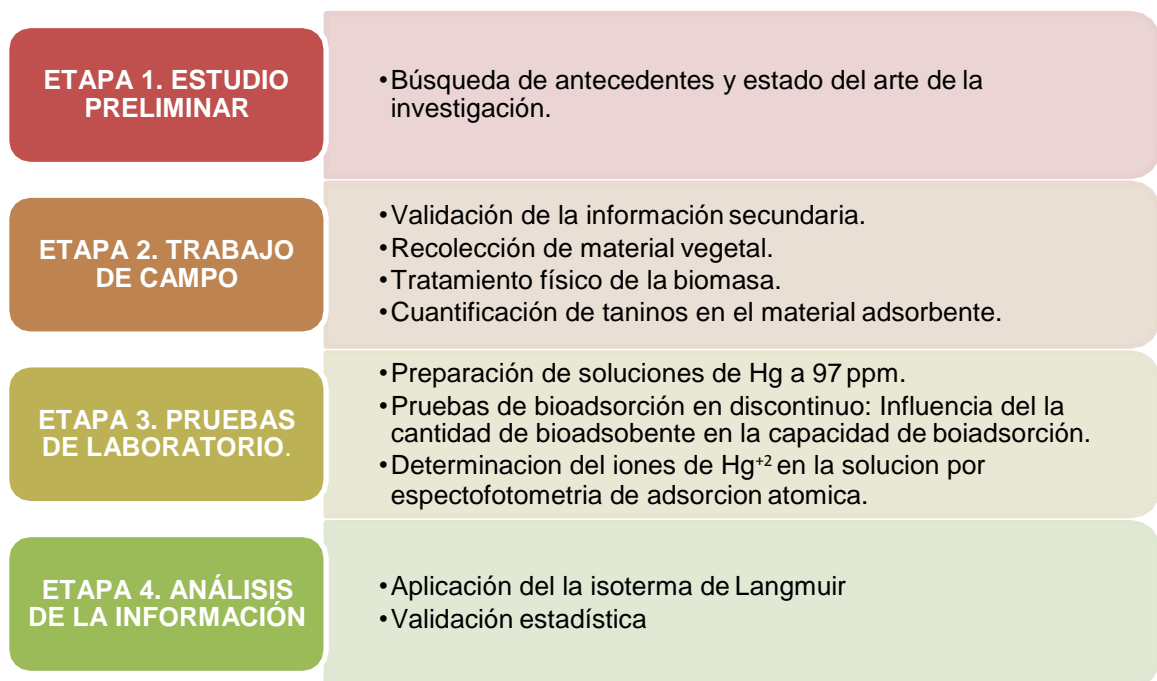
NORMATIVIDAD	ATR	CONTENIDO
"Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones"		
<b>Resolución 0631 de 2015</b> "por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones"	3,9,	Parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales.

**Fuente.** Autores, 2016.

## 6. METODOLOGÍA

Esta investigación es de tipo experimental en la que se determinó la bioadsorción de iones de mercurio con vainas de *Moringa oleífera*, donde se manejó como variable independiente la cantidad de bioadsorbente, analizando la influencia que esta variable independiente tiene con las tres covariables, las cuales son pH, temperatura y tiempo de contacto.

Este experimento se dividió en cuatro etapas como se observa en la Figura 11, la primera etapa se basó en la búsqueda de antecedentes y estado del arte de la *Moringa oleífera*, la segunda etapa consistió en la recolección, tratamiento y cuantificación de taninos del material vegetal de la *Moringa oleífera* (bioadsorbente), en la tercera etapa se realizaron las pruebas de laboratorio donde se preparó la concentración inicial de iones de  $Hg^{+2}$  y las pruebas de bioadsorción en discontinuo con el bioadsorbente y en la cuarta etapa se determinó la concentración final de iones de  $Hg^{+2}$  presentes en la solución.



**Figura 11.**Procedimiento empleado en el proyecto de investigación. **Fuente.** Autores, 2016.



## 6.1. ETAPA 1. ESTUDIO PRELIMINAR

Se realizó una búsqueda detallada sobre la estructura y composición vegetal de la *Moringa oleífera* en la que se encontraron 20 artículos (Pastos y Forrajes<sup>117</sup>, Tecnocientífica URU<sup>118</sup>) sobre el proceso de bioadsorción con diferentes bioadsorbente expuestos a diferentes metales pesados se hallaron 33 artículos (CENIC Ciencias Biológicas<sup>119</sup>, Redalyc<sup>120</sup>, Nexo<sup>121</sup> y Soc Quím Perú<sup>122</sup>) y respecto a la realización de la isoterma de adsorción se evidenciaron 5 artículos científicos. Toda esta información fue la base para llevar a cabo esta investigación de bioadsorción de iones de mercurio implementando las vainas de la *Moringa oleífera*.

## 6.2. ETAPA 2. TRABAJO DE CAMPO

### 6.2.1. Recolección del material vegetal y tratamiento físico de la biomasa

Se utilizaron 100 vainas de *Moringa oleífera* asumiendo una pérdida del 10% debido a las condiciones agroclimáticas, estas fueron obtenidas del centro de investigación CORPOICA Nataima, ubicado en el km 9 vía Espinal- Chicoral con coordenadas 4°12'30"N y 74°58'36"W y cuenta con una altitud 323 m.s.n.m. Las vainas fueron recolectadas y lavadas según protocolo sobre recolección de vainas arbóreas (Anexo A); seguidamente se extrajeron las semillas, se secaron al sol, a una temperatura de 33°C por dos semanas, después fueron cortadas, continuo a esto se lavaron con abundante agua, se secaron durante 41 horas a una temperatura de 40°C en un horno Memmert, consecutivamente el material vegetal

<sup>117</sup> Pastos y Forrajes, 1978. Disponible en <http://payfo.ihatuey.cu/index.php/pasto/index> recuperado el 14 de febrero de 2017.

<sup>118</sup> Tecnocientífica URU. 2007. Disponible en <http://200.35.84.134/ojs-2.4.2/index.php/rtcu/index> recuperado el 14 de febrero de 2017.

<sup>119</sup> CENIC Ciencias Biológicas. Disponible en <http://revista.cnic.edu.cu/revistaCB/> recuperado el 14 de febrero de 2017.

<sup>120</sup> Redalyc. Disponible en <http://www.redalyc.org/> recuperado el 15 de febrero de 2017.

<sup>121</sup> Nexo. Disponible en <http://www.lamjol.info/index.php/NEXO> recuperado el 15 de febrero de 2017

<sup>122</sup> Soc Quím Perú. Disponible en [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_serial&pid=1810-634X&lng=es](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_serial&pid=1810-634X&lng=es) recuperado el 15 de febrero de 2017.



deshidratado fue molido en un procesador de alimentos y fueron tamizadas con un tamaño de partícula de 1 mm.

## 6.2. Cuantificación de Taninos en el material bioadsorbente

Seguido de la recolección y tratamiento físico de la biomasa el polvo fino fue caracterizado mediante un análisis fitoquímico en el laboratorio LASEREX de la universidad del Tolima utilizando un método analítico de espectrofotometría ultravioleta-visible con el fin de determinar la cantidad de taninos presentes en la biomasa.

## 6.3. ETAPA 3. PRUEBAS DE LABORATORIO

### 6.3.1. Preparación de la solución de Cloruro de Mercurio ( $HgCl_2$ )

Para calcular la cantidad de cloruro de mercurio ( $HgCl_2$ ) que se necesitó para preparar una disolución de 10 L y obtener una concentración de 97 ppm, la cual se expresó en unidades basada en la relación peso/peso; se realizó la siguiente conversión:

$$\frac{\text{_____}}{\text{_____}} = \frac{\text{_____}}{\text{_____}}$$

**Nota:** El ( $HgCl_2$ ) se encontraba con una pureza del 100%.

Obtenidos los gramos necesarios para esta investigación se realizó un pesaje de 1,35 g de cloruro de mercurio  $HgCl_2$  en una balanza analítica, se agregó esta sal de mercurio a un beaker de 1000 mL con 40 mL de agua destilada y se colocaron en un agitador magnético para que solubilizar, luego se diluyó en un blanco de 10 litros de agua destilada, esta cantidad fue medida con matraz aforado de 1000 mL, para así observar el comportamiento que tendría el adsorbato en el proceso de bioadsorción.

### 6.3.2. Proceso de bioadsorción de iones de Mercurio ( $Hg^{+2}$ )



## BIODSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera*

Para desarrollar este proceso se estableció la temperatura del laboratorio de la universidad de Cundinamarca, Seccional Girardot a 28 °C, seguidamente se pesaron 5, 10 y 15 g de vainas de *Moringa oleífera*, las cuales fueron expuestas a la solución de cloruro de mercurio ( $HgCl_2$ ) sin modificar su pH que oscilaba de 6 a 7, para determinar los porcentajes de adsorción de las vainas de *Moringa oleífera* a tres tiempo establecidos por esta investigación de (20, 60 y 100 min), con el fin de establecer el tiempo óptimo de remoción con las condiciones de pH y temperatura ya establecidas.

Este procedimiento se desarrolló en un beaker de 1000 mL colocados en los agitadores magnéticos a 200 rpm, donde se puso en contacto la biomasa con los tiempos como se observa en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Tratamientos para el proceso de Bioadsorción de iones de  $Hg^{+2}$

T	C.B.M (g)	T.C (min)	C.I (ppm)	pH	Temperatura °C
T <sub>0/0</sub>	0	0	97	7	28
T <sub>5/20</sub>	5	20	97	7	28
T <sub>5/60</sub>	5	60	97	7	28
T <sub>5/100</sub>	5	100	97	7	28
T <sub>10/20</sub>	10	20	97	7	28
T <sub>10/60</sub>	10	60	97	7	28
T <sub>10/100</sub>	10	100	97	7	28
T <sub>15/20</sub>	15	20	97	7	28
T <sub>15/60</sub>	15	60	97	7	28
T <sub>15/100</sub>	15	100	97	7	28

**Convenciones:** T: tratamientos; C.B.M: Cantidad de bioadsorbente vainas de moringa; T.C: Tiempo de contacto; C.I: concentración inicial. **Fuente.** Autores, 2016.

Una vez finalizado el tiempo de contacto, cada tratamiento se filtró al vacío con el equipo Rocker 300ss como se observa en la Figura 12; el bioadsorbente usado en este proceso fue donado al grupo de investigación de agricultura orgánica y salud en el suelo (AOSS) de la universidad de Cundinamarca, seccional Fusagasugá para continuar con el proceso de desorción. Seguido a este proceso se tomó 500 mL de la solución de cada tratamiento, las cuales fueron enviadas al laboratorio de CORPOICA-MOSQUERA donde se analizó por espectrofotometría de adsorción atómica (EAA) la cantidad de iones de  $Hg^{+2}$  presentes en cada tratamiento, la

**BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera***

solución restante en este proceso fue puesta en disposición del laboratorio de la universidad de Cundinamarca, seccional Girardot como residuo peligroso.



**Figura 12.** Procedimiento de Bioadsorción de iones de  $Hg^{2+}$  Usando *Moringa oleífera* como bioadsorbente. **Fuente.** Autores, 2016.

#### 6.4. ETAPA 4. ANÁLISIS DE DATOS

Para establecer el porcentaje de disminución de iones de  $Hg^{+2}$  en cada tratamiento se realizó una tabulación por medio del software Excel, para determinar el tiempo óptimo de retención de iones de  $Hg^{+2}$  los datos obtenidos se corrieron por medio de la prueba de Kurskal-wallis, la cual se interpretó por medio de una caja y bigotes (grafica de barras) la concentración final vs tiempo, para comprobar la cantidad de mercurio retenido se creó la isoterma de Langmuir a una única concentración de iones de  $Hg^{+2}$ .



## 6.5. TÉCNICAS O INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

- Protocolo de recolección de vainas especie arbórea: *Moringa oleífera*.
- Instructivo para la toma de muestra para aguas residuales.
- Protocolo para el proceso de bioadsorción en laboratorio.

La Tabla 8 muestra los instrumentos y reactivos necesarios para llevar a cabo el presente estudio.

**Tabla 8.** Instrumentos y reactivos utilizados en el proyecto de investigación.

INSTRUMENTOS	REACTIVOS
<ul style="list-style-type: none"><li>• Dispositivo GPS</li><li>• Cámara fotográfica</li><li>• tijeras de jardinería</li><li>• Machete</li><li>• Bolsas de plástico con cierre hermético</li><li>• Procesador de alimentos doméstico</li><li>• Horno</li><li>• Beaker de 1000 mL</li><li>• Rocker 300ss</li><li>• pipeta</li><li>• Agitador</li><li>• Gotero</li><li>• Agitadores magnéticos</li><li>• Autoclave</li><li>• Bomba de vacío</li><li>• Balanza digital</li><li>• pH metro</li><li>• Papel de Filtro</li><li>• Embudo</li><li>• Vidrio de reloj</li><li>• Botellas de pbc</li><li>• Nevera hermética</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Agua destilada para el lavado y preparación de las disoluciones</li> <li>• Cloruro de Mercurio HgCl<sub>2</sub>, 99%.</li></ul>

FUENTE. Autores, 2016.



## 6.6 ANÁLISIS DE CUANTIFICACIÓN DE TANINOS EN EL MATERIAL BIOADSORBENTE

Para el análisis químico se utilizó una bolsa de papel craft la cual contenía 500 g. de la biomasa (polvo de vainas de *Moringa oleífera*), que fueron enviados al Laboratorio LASEREX en Ibagué, para determinar la cantidad de taninos por medio de la técnica de espectrofotometría ultravioleta visible.

## 6.7 ANÁLISIS QUÍMICOS

Para los análisis químicos se usaron botellas plásticas de 500 mL esterilizadas, las cuales fueron usadas para tomar las muestras de cada tratamiento bajo la metodología de la toma de muestras de aguas residuales (IDEAM). Estas muestras fueron enviadas al laboratorio de CORPOICA- MOSQUERA para determinar la concentración de iones de  $Hg^{+2}$  mediante el método de espectrofotometría de adsorción atómica (EAA).

## 6.8. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

La tabulación de los gráficos y los datos se realizaron en el programa Microsoft Excel; para calcular el porcentaje de remoción de iones de  $Hg^{+2}$  ejercida por las vainas de la *Moringa oleífera*. Se aplicó la siguiente fórmula:

\_\_\_\_\_

Donde  $i$  es la concentración inicial del metal (ppm),  $f$  es la concentración final del metal (ppm)<sup>123</sup>.

Para el análisis estadístico de los datos se seleccionó la prueba de Kruskal –wallis, ya que permite evaluar datos no paramétricos, debido a que no asume normalidad en los datos<sup>124</sup>. En el presente estudio los factores controlados (variables) son: pH, temperatura, tiempo y cantidad de biomasa, mientras la covariable es la

<sup>123</sup> Murithi, G., Onindo, C. O., Wambu, E. W., & Muthakia, G. K. Removal of Cadmium (II) Ions from Water by Adsorption using Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) Biomass. 2014.

<sup>124</sup> universidad de Castilla. (s.f.). Anova un factor y Kruskal-Wallis. Recuperado el 12 de Febrero de 2017, de <http://serviciod.uclm.es/>



**BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE  
VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera***

concentración de iones de  $Hg^{+2}$ . Este análisis fue realizado usando el paquete estadístico *past*, verificando el tiempo óptimo de adsorción de iones de  $Hg^{+2}$ .



## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1. PROCESO DE RETENCIÓN DE IONES DE $Hg^{+2}$ POR MEDIO DE LOS TANINOS PRESENTES EN LAS VAINAS DE *Moringa oleífera*.

Se identificó que la *Moringa oleífera* contiene 1,5 mg de taninos como lo confirma el análisis Fitoquímico de espectrofotometría ultravioleta-visible realizado a las vainas en esta investigación, además Hernández, 2008<sup>125</sup> afirma que estas sustancias contienen un grupo denominado polihidroxi-polifenol, las cuales son especies activas implicadas en la etapa del desarrollo de biosorción, de igual manera esta especie vegetal tiene la capacidad de realizar la retención con otros metales pesados como lo muestra Rodríguez, 2015<sup>126</sup> en su estudio de remoción de manganeso (II) usando cápsulas de *Moringa oleífera* con una remoción del 95% otro estudio es el de García *et al*, 2012<sup>127</sup>, el cual concluye que la cáscara de la *Moringa oleífera* tiene una capacidad de retención del 93.15, 96.93 y 95.16 % para el Ni, Cu y Cd respectivamente y Vázquez, 2016<sup>128</sup> demostró la efectividad de la adsorción de la hoja de la *Moringa oleífera* con respecto al arsénico obteniendo un 90.3 % de remoción.

Lo anterior se debe gracias a la presencia de taninos en las vainas de *Moringa oleífera*<sup>129</sup> que son los agentes que permiten que ocurra la adsorción debido a que estos compuestos tienden a ionizarse con el cloruro de mercurio (I):

Δ

Luz

De tal manera donde el  $Hg_2Cl_2$  en presencia de luz y calor se descompone en  $HgCl^2$  y  $Hg^{130}$  y como resultado el  $HgCl^2$  tiende a mezclarse con el tanino que

<sup>125</sup> Hernández, Ángela. 2008. Influencia del tamaño de partícula en la biosorción de plomo con raspo de uva. España.

<sup>126</sup> Rodríguez, Mirla. et al. 2015. Un estudio de la remoción de manganeso (II) a partir de sistemas acuosos usando cápsulas de moringa oleífera como bioadsorbente. Venezuela.

<sup>127</sup> *Ibíd.*, p. 1104.

<sup>128</sup> *Ibíd.*, p. 48.

<sup>129</sup> *Ibíd.*, p. 51.



## BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera*

realiza la ionización desprendiendo un protón ( $H^+$ ) y tomando el  $HgCl_2$ , que según Brönsted y Lowry, en la teoría de ácido-base, los ácidos son una molécula o ión donadora de protones<sup>131</sup>. El porcentaje de iones de mercurio que no se removió fue debido a que estos compuestos son solubles y no son retenidos en el proceso de ionización del tanino y el  $HgCl_2$ .

### 7.2. PORCENTAJE DE REMOCION DE IONES DE $Hg^{+2}$

Con el fin de analizar el comportamiento de remoción de iones de  $Hg^{+2}$  con una concentración inicial de 97 ppm, se colocó en contacto tres cantidades de polvo de las vainas de *Moringa oleífera* (5, 10 y 15 g) en tres diferentes tiempos (20, 60 y 100 min). De las muestras realizadas en cada tratamiento se determinó la cantidad de iones de  $Hg^{+2}$  restantes en la solución, los resultados se muestran en la tabla 9, en la cual no fue posible determinar qué cantidad de biomasa realiza una mejor adsorción.

**Tabla 9.** Porcentaje de Remoción de iones de  $Hg^{+2}$  en cada tratamiento.

T	C.I (ppm)	C.F (ppm)	% Remoción
T <sub>0/0</sub>	97	97	0
T <sub>5/20</sub>	97	75	23
T <sub>5/60</sub>	97	58	40
T <sub>5/100</sub>	97	52	46
T <sub>10/20</sub>	97	70	28
T <sub>10/60</sub>	97	55	43
T <sub>10/100</sub>	97	52	46
T <sub>15/20</sub>	97	73	25
T <sub>15/60</sub>	97	52	46
T <sub>15/100</sub>	97	50	48

**Convenciones:** T: Tratamientos; C.I: Concentración inicial; C.F: Concentración final.

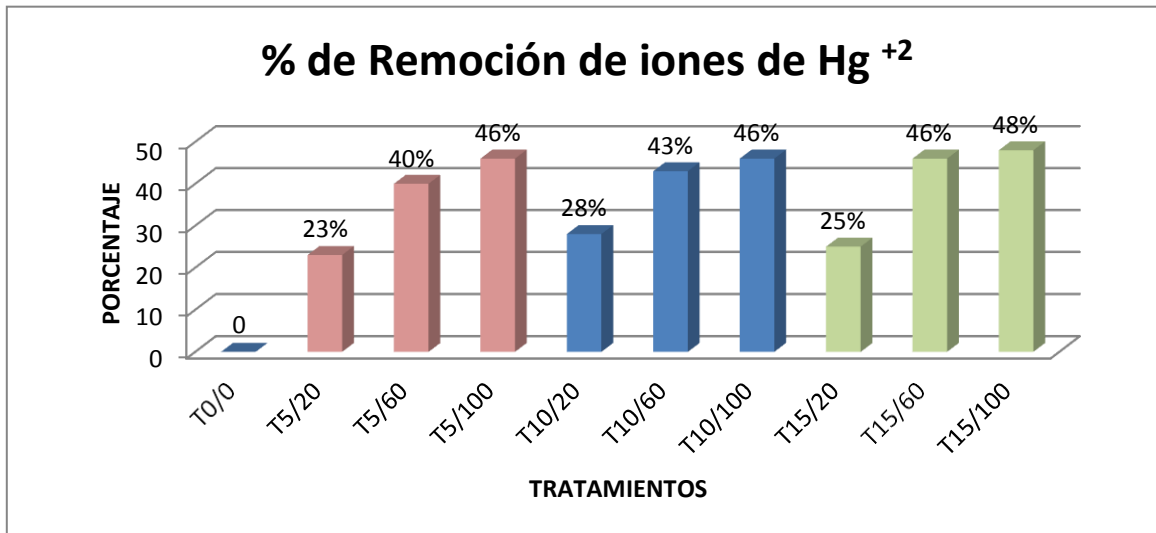
**Fuente.** Autores, 2016.

<sup>130</sup> Jiménez, Angélica, 2005. Interacción del mercurio con los componentes de las aguas residuales. Manizales.

<sup>131</sup> Universidad de Alcalá, 1995. Ácidos y bases. Madrid

**BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera***

Para realizar una mejor interpretación de la Tabla 9, se realizó una gráfica (Figura 13), donde se contemplan los porcentajes de remoción adsorbida por el polvo de las vainas de la *Moringa oleífera* en cada tratamiento, en la que se observa un comportamiento similar en los tratamientos ( $T_{5/20}$ ,  $T_{10/20}$  y  $T_{15/20}$ ) con un porcentaje de remoción de iones de mercurio de 23% a 28% y para los tratamiento ( $T_{5/60}$ ,  $T_{5/100}$ ,  $T_{10/60}$ ,  $T_{10/100}$ ,  $T_{15/60}$  y  $T_{15/100}$ ) un porcentaje de remoción de iones de mercurio de 40% a 48%. Donde se esperaba que a mayor cantidad de biomasa fuera mayor el número de sitios activos disponibles para la bioadsorción<sup>132</sup>. Sin embargo, esto no se cumple debido a que “a una menor concentración de biomasa en la solución permite una mejor dispersión de la misma, lo cual facilita el contacto de los grupos activos de la biomasa con los iones de  $Hg^{+2}$ , lo que produce una mayor captura de iones metálicos”<sup>133</sup>; pero esto no se evidencio en esta investigación.



**Figura 13.** Porcentaje de Remoción de iones de  $Hg^{+2}$ . Fuente: Autore, 2016.

<sup>132</sup> Triviño L., Hernández C., 2016. Evaluación de la capacidad de bioadsorción de Pb (ii) y Cd (ii) presentes en soluciones sintéticas independientes empleando retamo espinoso (*Ulex europaeus*) como adsorbente. Bogotá D.C.

<sup>133</sup> Muñoz Torres, M. y. (2007). Remoción de metales pesados en aguas residuales. Universidad Autónoma de Querétaro.



**BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera***

Con los resultados adquiridos del porcentaje de remoción de iones de mercurio, se realizó un análisis ANOVA que permitió determinar la falta de normalidad de los datos, debido a esto se realizó una prueba de kruskal –wallis con un intervalo de confianza ( $p= 0.05$ ), en la que se obtuvo una  $p=0.66$  (Tabla 10), esto evidencia que no existe una diferencia significativa en la mediana de la concentración de iones de  $Hg^{+2}$  en las tres cantidades de biomasa utilizada y se deduce que la cantidad de biomasa es un factor no muy relevante en este proceso de bioadsorción, debido a que todos los tratamientos llegaron a reducir la concentración de iones de mercurio sin una variación notoria ejercida por la biomasa, estos resultados muestran que las características físicas y químicas del bioadsorbente son los factor que permite que ocurra un adecuado proceso de bioadsorción en cuanto se refiere a la biomasa y el tamaño de partícula que según Benítez, 2014 “al disminuir el tamaño de esta el número de centros activos por unidad se incrementa, al igual que la capacidad de adsorción de iones metálicos”

134 .

**Tabla 10.** Test de Kruskal-wallis con respecto a la biomasa.

$H(\chi^2): 0,8$ $H_c(\text{tie corrected}): 0,8276$ <b><math>P(\text{same}):0,6611</math></b>			
	5g	10g	15g
20min		0,8248	0,5066
60min	1		0,8248
100min	1	1	

**Fuente.** Past, 2016.

<sup>134</sup> Benítez, L. T. (2014). ESTUDIO DE MODIFICACIÓN QUÍMICA Y FÍSICA DE BIOMASA (*Citrus sinensis* Y *Musa paradisiaca*) PARA LA ADSORCIÓN DE METALES PESADOS EN SOLUCIÓN. Luna Azul.

### 7.3. DETERMINAR EL TIEMPO ÓPTIMO DONDE SE ALCANCE LA MAYOR RETENCIÓN DE IONES DE MERCURIO.

Para determinar el tiempo óptimo en la bioadsorción de iones de  $Hg^{+2}$  usando vainas de *Moringa oleífera* se estableció una concentración inicial de 97 ppm, un pH de 7 y un tiempo de contacto máximo de 100 min a 200 rpm a una temperatura de 28°C.

La bioadsorción de los iones de  $Hg^{+2}$  es dependiente del tiempo, lo cual sugiere que la retención del ion puede ser a través de la interacción con grupos funcionales localizados en la superficie de la biomasa utilizada<sup>135</sup>; por este motivo se estudió la concentración de iones de mercurio en función del tiempo en min, en el cual se tomaron muestras a los minutos 0, 20, 60 y 100 min con tres diferentes cantidades de bioadsorbente (5, 10 y 15g). En la gráfica (Figura 14) se puede evidenciar la concentración final de cada uno de los tratamientos establecidos por esta investigación, donde se evidencia que en el tiempo de 20 min el tratamiento que más se destacó fue el de la biomasa de 10 g con una concentración final de 69ppm con un porcentaje de remoción de 28%, en los minutos 60 y 100 sobresale la biomasa de 15g con una concentración final de 52 y 50 ppm respectivamente con un porcentaje de remoción de 46%.

---

<sup>135</sup> Cascaret-Carmenaty, D. A. (2014). Determinación de la capacidad de adsorción de cromo (VI) por biomasa bacteriana. Revista Cubana de Química.

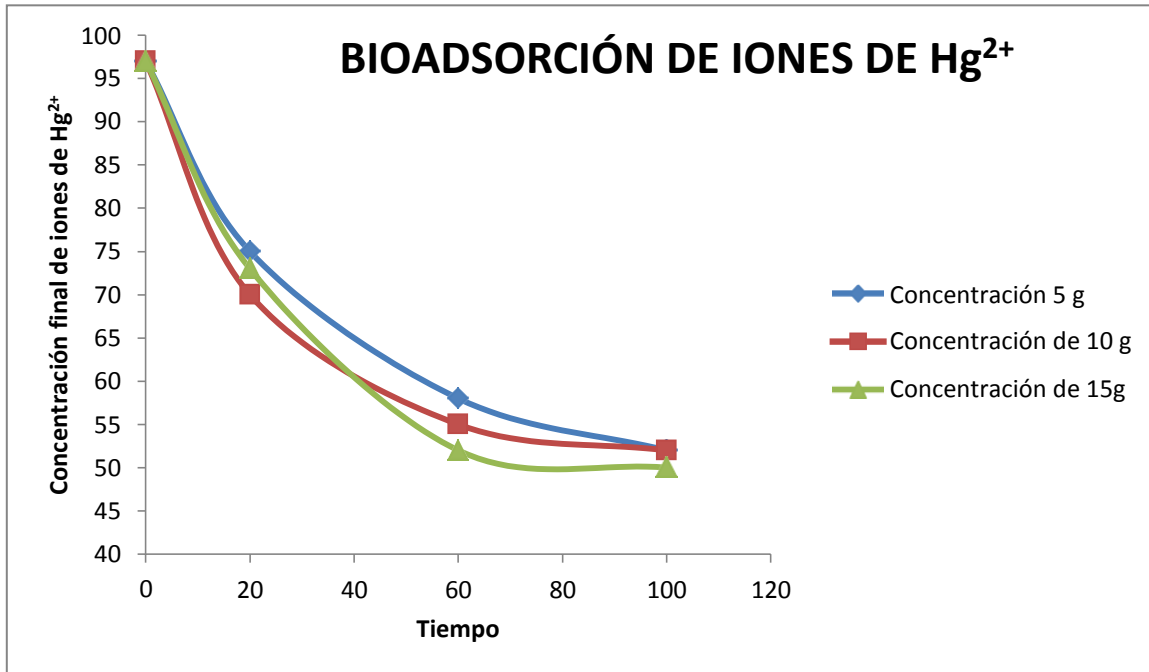


Figura 14. Bioadsorción de iones de Hg<sup>2+</sup> respecto al tiempo. Fuente. Autores, 2016.

Con la gráfica (Figura 14) no fue posible determinar el tiempo óptimo de bioadsorción debido a que la cantidad de tiempos estimados no fue suficiente para llegar a un equilibrio de adsorción, para observar con mayor detalle las variaciones de las concentraciones finales de iones de Hg<sup>2+</sup> se usó la prueba de kruskal-wallis con un intervalo de confianza ( $p= 0.05$ ), en la que se obtuvo una  $p=0.03$  (Tabla 11.), esto evidencia que existe una diferencia significativa en la mediana de la concentración de iones de Hg<sup>2+</sup> en los tres tiempos implementados.

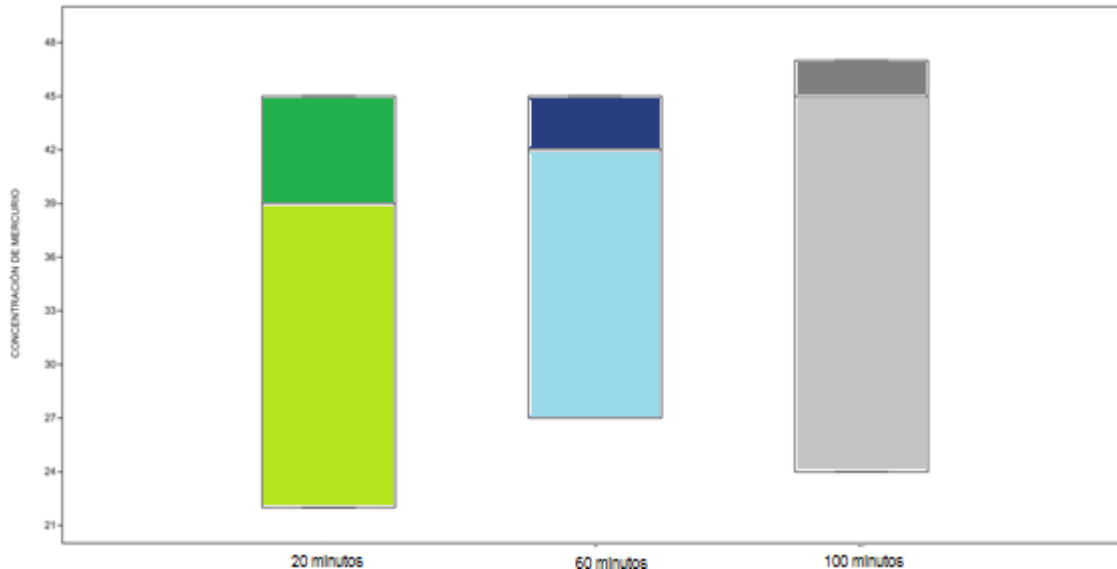
Tabla 11. Test de Kruskal-wallis respecto al tiempo de bioadsorción.

$H(\chi^2): 6,489$ $H_c(\text{tie corrected}): 6,713$ $P(\text{same}): 0,03486$			
	5g	10g	15g
20min		0,08086	0,07652
60min	0,2426		0,1642
100min	0,2296	0,4925	

Fuente. Past, 2016.

Posterior a esto se realizó una gráfica de cajas y bigotes (Figura 15) en la que se observa que en el tiempo de 20 min en la parte inferior de la caja es mayor que la superior, esto quiere decir que el tiempo se encuentra a un mayor grado de

disparidad, destacándose este tiempo de los demás; este resultado nos afirma que los procesos de adsorción de metal o compuesto orgánico/biomasa tienen tiempos cortos, llegando al equilibrio en unas pocas minutos.<sup>136</sup>



**Figura 15.** Análisis de caja y bigotes del tiempo de bioadsorción. **Fuente.** Autores, 2016.

#### 7.4. DETERMINACIÓN DE LA ISOTERMA DE LANGMUIR.

Al realizar el análisis de la isoterma con los factores propuestos en esta investigación; se implementó un modelo de isoterma de adsorción diferente a los que otros investigadores han diseñado, debido a que este estudio experimental implementaba tres cantidades de bioadsorbente con una única concentración de iones de  $Hg^{+2}$  (97 ppm) con el fin de observar si se presentaba un ajuste de los datos experimentales.

Este proceso se inició con un pH que oscilaba de 6 a 7, debido a que Colpas, 2016 en su investigación de adsorción de mercurio afirma que “a valores de pH comprometidos entre 2 y 4 hay un aumento de adsorción de iones de mercurio y

<sup>136</sup> Carro, L., et al. Eliminación del mercurio: un estudio físico-química de la interacción de metal con materiales naturales, 2009.



## BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera*

entre 4 y 7 el sistema entra en equilibrio”<sup>137</sup>, por esta razón esta investigación busco determinar los porcentajes de adsorción con las vainas de *Moringa oleífera* a un pH de 6 a 7, con una temperatura controlada de 28°C y con una concentración de iones de Hg<sup>+2</sup> de 97 ppm debido a que se buscaba confirmar lo que planteo Murillo en el 2011 que “estos procesos son más rápidos en concentraciones bajas; sin embargo a altas concentraciones se observó una disminución en la velocidad de adsorción”<sup>138</sup>.

Debido a que no se logró establecer el tiempo en equilibrio para adsorción de iones de Hg<sup>+2</sup> por la insuficiencia de datos escogidos, no fue posible determinar la isoterma de adsorción causando un impedimento para cumplir el modelo propuesto de Isoterma de Langmuir.

<sup>137</sup> Fredy Colpas, A. A. (Octubre de 2016). Adsorción de Mercurio Utilizando Carbones Activados. Recuperado el 2017 de febrero de 10, de <http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v27n5/art09.pdf>

<sup>138</sup> Yesid S. Murillo, L. G. (15 de abril de 2011). DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE ADSORCIÓN DE 2,4-DINITROFENOL EN CARBONIZADO DE HUESO BOVINO POR ESPECTROFOTOMETRÍA UV-VIS. Recuperado el 2017 de febrero de 11, de <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/23151/28390>



## **8. CONCLUSIONES**

- Después de haber analizado el proceso de bioadsorción se concluye que la cantidad de biomasa es un factor no muy relevante en el proceso de bioadsorción, debido a que todos los tratamientos llegaron a reducir la concentración de iones de mercurio sin una variación notoria ejercida por la biomasa, estos resultados muestran que las características físicas y químicas del bioadsorbente son los factores que permite que ocurra un adecuado proceso de bioadsorción.
- Como resultado de la investigación estadística presentada, es posible concluir que el mejor tiempo para la bioadsorción de iones de  $Hg^{+2}$  es de 20 min, confirmando que este proceso ocurre en tiempos cortos.
- La isoterma de adsorción de Langmuir es un modelo simplificado en el cual indica que la superficie del sólido contiene ciertos números de sitios activos para la sorción adsorbiendo una molécula por cada sitio; de este proceso matemático se obtiene la relación entre la cantidad de adsorbato retenido por la unidad de masa de adsorbente [mg/g], para así determinar la capacidad de adsorción.

## **9. RECOMENDACIONES**

- Realizar la caracterización total del material bioadsorbente incluyendo propiedades físicas y químicas como: tamaño de partícula, área superficial y porcentaje de porosidad, ya que estas variables influyen en el proceso de biosorción.
- Realizar el proceso de biosorción teniendo en cuenta los factores de pH y diferentes concentraciones iniciales para determinar en cuál de estos parámetros se realiza la mayor adsorción del contaminante.
- Aumentar el tiempo de contacto del bioadsorbente con la solución acuosa contaminada, para así establecer si la adsorción llega a incrementar o pasa a un estado de desorción.
- Se recomienda realizar el análisis bromatológico inicial y final para determinar la cantidad de nutrientes que posee el bioadsorbente antes de ser expuesto a un contaminante y después de realizar el proceso de bioadsorción.



**UDEC**  
UNIVERSIDAD DE  
CUNDINAMARCA

**BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE  
VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera***

## 10. ANEXOS

### Anexo A. Protocolo de recolección de vainas especie arbórea: *Moringa oleífera*.

**UDEC**  
UNIVERSIDAD DE  
CUNDINAMARCA






*Moringa oleífera*

**PROTOCOLO DE RECOLECCIÓN DE VAINAS**  
ESPECIE ARBOREA: *Moringa oleífera*  
2016

**NOMBRE DEL PROCESO:**  
BIOSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera*.

**ELABORADO POR:**  
STEFANIA OVIEDO T.  
ERIKA JULIETH VILLALBA C.

**DIRECTOR:**  
JOSE EVER RAMIREZ C.

#### INTRODUCCIÓN


Las alburas o vainas de diversas especies vegetales son de gran utilidad para productos comerciales e industriales, por sus diversos contenidos, como es la vaina de la especie *Moringa oleífera*, originaria de la India, donde se resalta por los sabores agregados en la cocina, Malasia; en la parte productiva la obtención de etanol debido al alto contenido de lignina.

Esta biomasa podría estar vinculada al proceso de bioadsorción de metales pesados, por su contenido de taninos, que en particular, son polifenoles, semejantes funcionalmente a la lignina, que se han usado como adsorbentes de metales pesados, en esta especie arbórea el porcentaje de taninos va de 0.9% hasta 12.4%, siendo una especie muy opcional para la remoción de metales pesados. Esta remoción se hará en estado líquido representando una gran herramienta para la descontaminación del recurso más importante y vital para la biosfera.

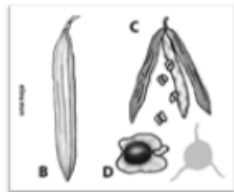
#### DEFINICIONES

**Limbo:** El limbo o lámina, es la parte generalmente laminar plana, verde y ancha de la hoja, se encuentra surcado por una serie de líneas o cordones, perfectamente visibles al trasluz y salientes por el envés, llamadas nervaciones, nervaduras o nervios.

**Pecíolo:** es el órgano que une la lámina foliar con el tallo o rama y sirve de puente al paso de agua y nutrientes.



**Vaina:** es la terminación ensanchada del peciolo en el punto de unión con el tallo, en algunas monocotiledóneas, como las gramíneas, parte basal de las hojas, que envuelve al tallo.



#### OBJETIVO

Recolectar vainas secas de las especies vegetales de *Moringa oleífera* y para deshidratación completa que posteriormente serán sometidos a los procedimientos respectivos de Bioadsorción de mercurio.

#### ALCANCE

Realizar el procedimiento de recolección de las vainas secas de las especies arbóreas *Moringa oleífera* mediante recolecta directa, para sus posteriores tratamientos procedimientos previos a la molienda de las vainas serán en la universidad de Cundinamarca seccional Girardot ubicada en la Carrera 19 número 24-209 del municipio de Girardot – Cundinamarca, con las siguientes coordenadas: latitud 4°18'23.08" Norte y longitud 74°48'26" Oeste (Google Earth, 2015).

#### MATERIALES Y EQUIPOS

- Gramera o balanza analítica
- Tijeras para podar

- Hoja de bisturí
- Bolsa de Papel
- Bolsa plástica con cierre hermético (Ziploc)
- Cámara fotográfica.
- Machete
- Marcadores indelebles
- Etiquetas autoadhesivas
- Tabla soporte
- Formatos registros
- Decámetro.
- Lapiceros.
- Bolsas plásticas negras jumbo

#### Responsables:

- Erika Julieth Villalba Cortes
- Stefania Oviedo Tapia

Estudiantes de Ingeniería ambiental UDEC

#### METODOLOGIA

Paso 1. Identificación y descripción de los árboles.

Paso 2. Escoger aleatoriamente los árboles de donde extraerán las vainas.

Paso 3. Registro de los árboles escogidos.

Paso 4. Recolecta manual de las vainas o cápsulas.

Paso 5. Conteo de vainas.

Paso 6. Pesaje y medición de las vainas recolectadas (individual y total) con las semillas.

Paso 7. Extracción de semillas.

Paso 8. Pesaje de las vainas recolectadas (individual y total) sin las semillas, para el caso del algarrobo todo incluido.

Paso 9. Almacenamiento de las vainas en bolsas ziploc.

Paso 10. Rotular cada bolsa con la cantidad, peso y fecha de la recolección.

Paso 11. Secado a una temperatura de 40° por 41 horas en un horno memmert

Paso 12. Realizar pre molienda manual con tijeras cortando las vainas en 5 cm.

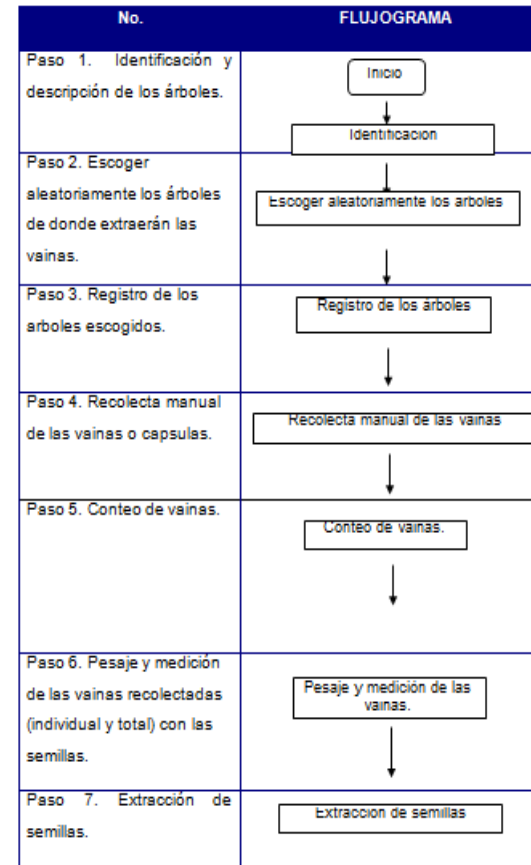
Paso 13. Secado a temperatura ambiente por dos días.

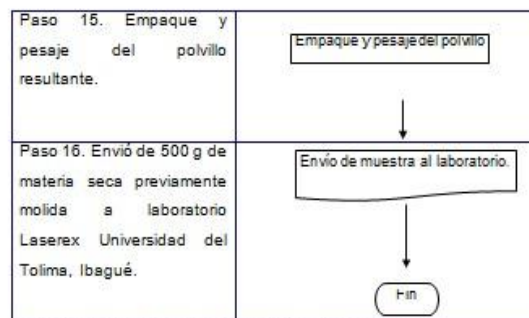
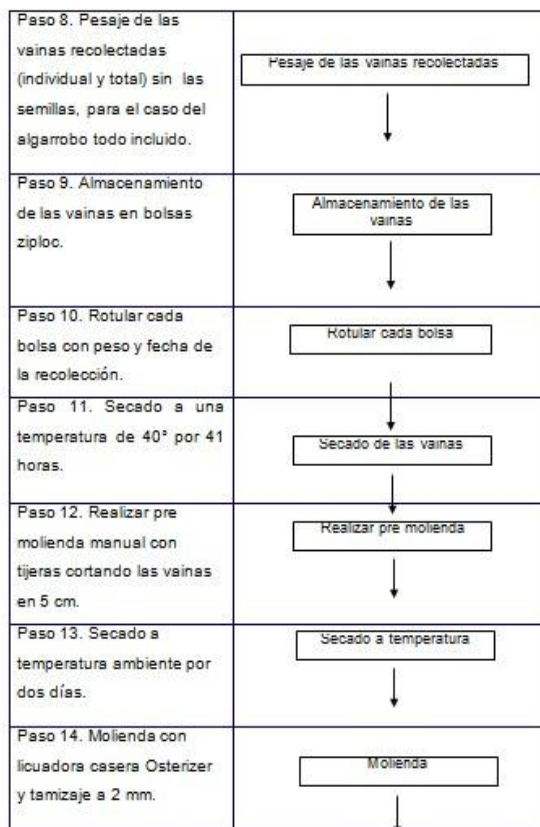
Paso 14. Molienda con licuadora casera Osterizer y tamizaje a 2 mm.

Paso 15. Empaque y pesaje del polvillo resultante.

Pase 16. Envío de 500 g de materia seca previamente molida a laboratorio Laserex Universidad del Tolima, Ibagué.

Flujograma:





Fuente esquema: Nelson Pérez. Copoica C.I. Nataima.



Imagen 1. Proceso de recolección y empaque de las vainas de *Moringa oleífera*



#### REFERENCIAS

- Asociación Española para la Cultura, el Arte y la Educación . (s.f.). *Natureduca*.  
Obtenido de Botánica: [http://www.natureduca.com/botan\\_organ\\_hojas1.php](http://www.natureduca.com/botan_organ_hojas1.php)
- Sotomayor , G., Peña , J., & Potaschkin, P. (18 de marzo de 2010). *Método de  
remoción de metales pesados tóxicos*. Obtenido de Google académico:  
<http://www.google.com/patents/WO2010028516A1?cl=es>
- Unibe , A. F. (noviembre de 1998). *Procesos y productos tecnologicos por  
macrorregión* . Obtenido de Corporacion colombiana de investigación  
agropecuaria : [https://books.google.com.co/books?id=tq-\\_PoozvikC&pg=PA51&lpg=PA51&dq=prosopis+juliflora+taninos&source=bl&ots=gg2015qVxh&sig=xNQzvl-m5w2EsYd8IFdxmhbiOs&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjs4d3lzaTLAhXGbT4KHdLyBnkQ6AEIUTAJ#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=tq-_PoozvikC&pg=PA51&lpg=PA51&dq=prosopis+juliflora+taninos&source=bl&ots=gg2015qVxh&sig=xNQzvl-m5w2EsYd8IFdxmhbiOs&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjs4d3lzaTLAhXGbT4KHdLyBnkQ6AEIUTAJ#v=onepage&q&f=false)



**Anexo B. Cuantificación de taninos por el método analítico de  
espectrofotometría ultravioleta-visible.**

	<b>GIPRONUT</b>		
<b>REPORTE RESULTADOS ANÁLISIS FITOQUIMICOS</b>			
USUARIO (persona o entidad)		STEFANIA OVIEDO TAPIA	
FECHA DE RECEPCION	FECHA DE MUESTREO	FECHA DE ENTREGA	
05/07/2016	..*	27/018/15	
TIPO DE ANALISIS	VEREDA	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO
Taninos condensados-Fenoles totales	Chicoral	Espinal	Tolima
N° CONSECUTIVO	....	....	OBSERVACIONES
IDENTIFICACION	....	....	
PUNTO DE MUESTREO	....	....	
MUESTRAS	FENOLES TOTALES	TANINOS COND.	MÉTODO ANALÍTICO
<i>Moringa Oleifera (vainas sin semilla)</i>	2,5 mg eq- ácido gálico/g. muestra ± ,0049	1,5 mg eq- ácido tánico/g. muestra ± ,0051	Espectrofotometrico
Observaciones :			
1. Los resultados son reportados en base seca.			
2. Los resultados encontrados son válidos únicamente para la muestra analizada. La misma fue tomada por personas ajenas al laboratorio.			
3. GIPRONUT no se hace responsable de la interpretación de los resultados ni de la forma como se proceda con ellos.			
FIRMA:			
NOMBRE:		Investigador GIPRONUT	
MAT. PROF:		Luis Oveimar Barbosa Jaimes	
TELEFAX:		PQ-2316	
		2771212 EXT 9359	



**BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE  
VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera***

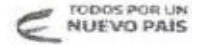
**Anexo C. Análisis de espectrofotometría de adsorción de los iones de Hg<sup>2+</sup>.**

INFORME N° -A1 (15 35-1 144)

	VINCULACIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA	Código: VC_F_116
	Reporte de Resultados Laboratorio de Servicios para varias Muestras	Versión: 2 Fecha de vigencia: (01-02-2016)

LABORATORIO DE QUÍMICA DE SUELOS, AGUAS Y PLANTAS

**1. Información del cliente:**  
Nombre y Apellido: DANIEL CUBILLOS  
Cédula o NIT: 11386512  
Dirección:  
Opción: CUNDINAMARCA  
Municipio: GIRARDOT  
Tel. fijo/Celular: 3214295583  
Tipo de análisis: METALES PESADOS Hg



Número de solicitud  
**68**

**2. Información de la muestra**

Procedencia:  
Matriz: AGUA  
Tipo de agua: NO IONICA  
Tipo de agua: GOTEO  
Fecha de recepción: 2016-09-20  
Fecha de reporte: 2016-10-31

CODIGO LABORATORIO	DETERMINACIÓN ANALÍTICA	
	UNIDADES METODOS	Mercurio (Hg) µg/l SM3120 B Modificado
IDENTIFICACIÓN		VALORES
NOMBRE DE MUESTRA		RESULTADO
TRATAMIENTO 1	5 gramos 20 minutos	75 ppm
TRATAMIENTO 1	5 gramos 60 minutos	58 ppm
TRATAMIENTO 1	5 gramos 100 minutos	52 ppm
TRATAMIENTO 2	10 gramos 20 minutos	70 ppm
TRATAMIENTO 2	10 gramos 60 minutos	55 ppm
TRATAMIENTO 2	10 gramos 100 minutos	52 ppm
TRATAMIENTO 3	15 gramos 20 minutos	73 ppm
TRATAMIENTO 3	15 gramos 60 minutos	52 ppm
TRATAMIENTO 3	15 gramos 100 minutos	50 ppm
BLANCO	N.A	97 ppm

**OBSERVACIONES:**

Los resultados son válidos en la medida en que se cumplan las condiciones de referencia.  
Este documento ha sido generado de manera automática y es válido en su totalidad.  
Este documento no puede ser reproducido total ni parcialmente, sin la autorización formal de CORPOICA

CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA, NIT: 800194600-3  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN TIBAITATA  
KILOMETRO 14 VÍA MOSQUERA (CUNDINAMARCA)  
TELÉFONOS: 4227300, extensión 1414  
E-MAIL: ypaec@corpoeica.org.co

**FIN DEL INFORME**

Página 1 de 1



## 11. BIBLIOGRAFÍA

- Agarwal, H., et al. (2010), Eliminación del mercurio de las aguas residuales. El uso de adsorbentes verdes. Una revisión. Revista Electrónica de Medio Ambiente.
- Ahalya, N., et al. (2005). Biosorption of heavymetals. <http://144.16.93.203/energy/water/paper/biosorption/biosorption.htm>. Consultado el 10 de septiembre de 2016.
- Allard, B., Arsenie I. (1991). Abiotic Reduction of Mercury by Humic Substances in Aquatic System. An important process for the mercury cycle. Water Air and Soil Pollution.
- Alluri, H.K., et al. (2007). Biosorption: An eco-friendly alternative for heavy metal removal. African Journal of Biotechnology.
- Andrango Caizapanta, D. X. (2011). Estudio Isotérmico de Biosorción de cromo y cadmio en solución acuosa utilizando residuos de césped. Quito: Universidad Politécnica Salesiana.
- Babel, S., & Kurniawan, T. A. (2003). Adsorbentes de bajo costo para los metales pesados absorción por el agua contaminada: una revisión. Diario de materiales peligrosos.
- Bailey, S.E., et al. (1999) Una revisión de los adsorbentes potencialmente de bajo costo para los metales pesados. Water Research.
- Bailey, S.E., Olin T.J., Bricka R.M., Adrian D.D., (1999), Una revisión de los adsorbentes potencialmente de bajo costo para los metales pesados. Investigación del agua.
- Bhatnagar, A., Sillanpää M., (2010), Utilización de materiales de desecho agro-industriales y municipales como adsorbentes potenciales para el tratamiento agua -Una revisión. Diario de Ingeniería Química.
- Cañizares, R. O. (2000). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. Revista Latinoamericana de Microbiología.



**BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE  
VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera***

- Cardona, G. (2013) Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados, Pb (II) y Zn (II). En: Redalyc. Vol.; 17. No 1 (Ene-abril. 2013); p 1-9.
- Carro, L., et al. (2009). Eliminación del mercurio: un estudio físico-químico de la interacción de metal con materiales naturales. Journal of Chemical Technology and Biotechnology.
- Chojnacka, K. (2010). Biosorption and bioaccumulation - the prospects for practical applications. Environment International.
- Colombia Minera. (2011). Mitos y verdades. Químico maldito. Publicaciones Semana. pp. 160.
- Cuizamo, N., Navarro, A. (2005) Biosorción de metales pesados por algas marinas: posible solución a la contaminación a bajas concentraciones. En: Dialnet. Vol.; 104. No 2 (Mar-jun. 2012); p 120-125.
- Dávila, N., (2012). Caracterización del proceso de biosorción de metales pesados mediante residuos sólidos de café. Nuevo León: Tesis de Doctorado de la Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Dionisio, E. (2012). Aprovechamiento de residuos vegetales para la eliminación del cobre presente en medios acuosos mediante biosorción. Granada, 11-77p. Tesis doctoral (doctor). Universidad de Granada. Departamento de ingeniería química.
- Dupont, L., Bouanda J., Dumonceau J., Aplincourt M., (2003), Los iones metálicos de unión sobre un sustrato lignocelulósico extraída del salvado de trigo: un enfoque NICADonnan. Diario de coloide y Ciencia de interfaz.
- Farooq, U., Kozinski J.A., Khan M.A., Athar M., (2010), Biosorción de iones de metales pesados utilizando biosorbentes a base de trigo - Una revisión de la literatura reciente. Tecnología de Biorecursos.
- Febrianto, J. (2009). Equilibrio y estudios cinéticos de adsorción de metales pesados utilizando biosorbente: Un resumen de los estudios recientes. Journal of Hazardous Materials.



## BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera*

- Febriato, J. (2009). Equilibrio y estudios cinéticos de adsorción de metales pesados utilizando biosorbente: Un resumen de los estudios recientes.
- Fu, F.L., Wang Q. (2011). La eliminación de los iones de metales pesados de las aguas residuales. *Journal of Environmental Management*.
- Gadd, G.M. (2009). Biosorción: revisión crítica de la razón científica, la importancia del medio ambiente y la importancia para el tratamiento de la contaminación. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*.
- Gao, Y., Shi Z.M. (2012). Determinación y especiación de mercurio en muestras ambientales y biológicas mediante espectrometría atómica analítica. *Microchemical Journal*.
- García Ríos, M. (2008). Biosorción de cadmio con raspo de uva. Aproximación a la monitorización del proceso mediante sensores químicos. Cataluña: Tesis de grado de la Universidad Politécnica de Cataluña.
- Gavrilesco, M., (2004). La eliminación de los metales pesados del medio ambiente mediante la biosorción. *Ingeniería en Ciencias de la Vida*.
- Gu, B.H., Bian Y.R., Miller C.L., Dong W.M., Jiang X., Liang L.Y., (2011). Mercury reduction and complexation by natural organic matter in anoxic environments. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*
- Guo, X., Zhang S., Shan X., (2008), La adsorción de iones metálicos sobre la lignina. *Diario de materiales peligrosos*.
- Harikishore, . Et al. (2011). Biosorption of Ni(II) from aqueous phase by *Moringa oleifera* bark, a low cost biosorbent. *Desalination*.
- Herrero, R., et al. La eficiencia del alga roja *Mastocarpus stellatus* para la remediación de la contaminación de cadmio. *Bioresource Technology*. 2008.
- Hernández, A., (2008). Influencia del tamaño de partícula en la biosorción de plomo con raspo de uva. España.



**BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE  
VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera***

- Inglezakis, V. J., & Pouloupoulos, S. G. (2006). Adsorción, intercambio iónico y Catálisis. Diseño de Operaciones y Aplicaciones Ambientales.
- Jiménez, A., (2005). Interacción del Mercurio con los componentes de las aguas residuales. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Química.
- Leopold, K., Foulkes M., Worsfold P. (2010). Los métodos para la determinación y especiación del mercurio en las aguas naturales. Analytica Chimica.
- Liu, Y., Wang J. (2009). Fundamentos y aplicaciones de biosorción isotermas, Cinética y Termodinámica. Nova Science Publishers, Inc., New York.
- Lodeiro, P., Herrero R., Sastre de Vicente M.E., (2006b), Aspectos termodinámicos y cinéticos en la biosorción de cadmio en materiales de bajo costo: Una revisión. Environmental Chemistry.
- MacCarter, L., & Gaynor, D. (1980). Gorse: A Subject of Control in New Zealand. N. Z. Journal of. Experimental Agriculture.
- Manahan, S. (1994) Environmental Chemistry. Lewis Publishers Boca Ratón.
- Mancera, N., Álvarez R. (2005). Estado de conocimiento de las concentraciones de mercurio y otros metales pesados en peces dulceacuícolas de Colombia. En: Scielo. Vol.; 11. No 1 (Ago-Oct 2005); p 3-23.
- Marrugo, J. Evaluación de la contaminación por metales pesados en la ciénaga La soledad y Bahía de Cispatà cuenca del bajo Sinú, departamento de Córdoba. Montería, 2011, 12-45p. Proyecto presentado para la convocatoria interna de la universidad de córdoba. Universidad de Córdoba. Departamento de química.
- Merian, E., Clarkson T.W., (1991), Los metales y sus compuestos en el medio: la aparición, el análisis y la relevancia biológica. VCH, Weinheim; New York.



## BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera*

- Mudhoo, A., Garg V.K., Wang S.B., (2012), Removal of heavy metals by biosorption. Environmental Chemistry Letters.
- Murithi, G. L. (2010). The water Hyacinth *Eichhornia crassipes* (mart) solms as a biosorbent for cadmium (II) and lead (II) removal: kinetic and equilibrium. Kenyatta: Tesis de la Universidad de Kenyatta.
- Murithi, G., et al. (2014). Removal of Cadmium(II) Ions from Water by Adsorption using Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) Biomass.
- Ogata, T., Nakano Y. (2005). Mecanismos de recuperación de oro a partir de soluciones acuosas utilizando un adsorbente de gel novela tanino sintetizados a partir de tanino condensado naturales. Water Research.
- Perry, R. H. (2001). Manual del ingeniero químico. Sexta edición. Mexico: McGraw-Hill.
- Ramos, Claudia. Nivel de contaminación por metilmercurio en la región de la Mojana [En línea]. [24 agosto de 2015] disponible en: [http://www.hruschka.com/hgnet/members/claudia/metilmercurio\\_en\\_la\\_mojana.dc](http://www.hruschka.com/hgnet/members/claudia/metilmercurio_en_la_mojana.dc)
- Ravichandran, M., (2004). Interactions between mercury and dissolved organic matter- a review.
- Rodriguez, M., Florés, S., & Rangel, M., (2015). Un estudio de la remoción de manganeso (II) a partir de sistemas acuosos usando cápsulas de moringa oleífera como bioadsorbente. Centro de Ecología, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, IVIC.Venezuela.
- Ruiz Granada, E. D. (2012). Aprovechamiento de residuos vegetales para la eliminación de cobre presente en medios acuosos mediante biosorción. Granada: Tesis Doctoral de la Universidad de Granada.
- Sanchez, T., (2010). Características y potencialidades de *Moringa oleífera*, Lamark. Una alternativa para la alimentación animal. En: Pastos y Forrajes. Vol.; 33 No 4.

**BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE  
VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera***

- Suhas, P., Carrot R., (2007), Lignina adsorbente natural de carbón activado: Una revisión. Tecnología Biorecursos.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). Residuos de Ingeniería: Tratamiento y reutilización. Nueva York: Metcalf y Eddy, Inc., 4<sup>a</sup> edición, McGraw-Hill.
- Tejada, C. Biomasa residual para remoción de mercurio y cadmio: una revisión. En Ingenium. Vol.; 6. No 14 (Oct-Nov. 2012); p 11-21.
- Tejada, C., Villabona, Á., & Ruiz, V. (2012). Biomasa residual para remoción de mercurio y cadmio: una revisión.
- Tenorio, Genorio. (2006). Caracterización de la bioadsorción de cromo con hueso de aceituna. Granada, 11-97p. Tesis doctoral (doctor en ciencia y tecnología del medio ambiente). Universidad de Granada. Departamento de Ingeniería química.
- Triviño L., Hernández C., 2016. Evaluación de la capacidad de bioadsorción de Pb (ii) y Cd (ii) presentes en soluciones sintéticas independientes empleando retamo espinoso (*Ulex europaeus*) como adsorbente. Bogotá D.C.
- Universidad de Alcalá, 1995. Ácidos y bases. Madrid.
- Vázquez, F. (2016). Biosorción de Arsénico por hoja de Moringa. México.
- Volesky, B. (2003). Sorption and biosorption. BV Sorbex, St. Lambert, Quebec.
- Volesky, B., Holan Z.R., (1995), Biosorption of heavy metals. Biotechnology Progress.
- Wang, L.K. (2009). Heavy Metals in the Environment. CRS Press Taylor & Francis, Boca Raton.
- Wang, Q. (2004). Source and remediation for mercury contamination in aquatic systems-a literature review. Environmental Pollution.
- Wase, J., Forster C.F., (1997), Biosorbents for metal ions. Taylor & Francis, London.



**BIOADSORCIÓN DEL MERCURIO EN AGUA TRATADA, MEDIANTE EL USO DE  
VAINAS DE LA ESPECIE VEGETAL *Moringa oleífera***

- Zheng, W., Liang L.Y., Gu B.H. (2012). Mercury Reduction and Oxidation by Reduced Natural Organic Matter in Anoxic Environments.