

**ALTERNATIVAS DE POTABILIZACION PARA AGUAS CONTAMINADAS CON  
MERCURIO**

**JOSE GABRIEL ALVAREZ MENDOZA**

**1066185396**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL  
PAMPLONA – NORTE DE SANTANDER**

**2016**

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero quiero darle gracias a Dios por permitirme vivir estas experiencias, darme el valor, la fortaleza, salud y llenarme de sus infinitas bendiciones que me permitieron poder culminar mis estudios y hoy en día ser un Ingeniero Ambiental.

A mi padre por ser siempre un constante apoyo, por creer en mí y por sus valiosos consejos. A mi madre por su incondicional amor, por ser la mejor mamá del mundo, muchas gracias. Esto es por y para ustedes.

Mis amigos y profesores que me brindaron sus conocimientos y con ellos poder vivir la mejor experiencia de aprendizaje.

## CONTENIDO

INTRODUCCION.....	9
GENERALIDADES DEL MERCURIO .....	10
FORMAS DE ENCONTRARSE EL MERCURIO EN EL AGUA.....	10
RIESGOS EN LA SALUD.....	11
MARCO LEGAL.....	12
LIMITES PERMISIBLES DE MERCURIO, MINAMBIENTE (2010).....	12
ALTERNATIVAS PARA REMOVER MERCURIO DEL AGUA.....	13
ELIMINACION DE MERCURIO POR MEDIO DE RESINAS INTERCAMBIADORAS DE IONES .....	13
FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA CON DIÓXIDO DE TITANIO .....	16
ELIMINACION DE METALES PESADOS DE AGUAS CONTAMINADAS MEDIANTE ADSORCION SELECTIVA CON MATERIALES MESOESTRUCTURADOS HIBRIDOS .....	17
BIOMASA RESIDUAL PARA LA REMOCION DE MERCURIO .....	18
Remoción de Mercurio con biomasa modificada químicamente .....	21
REMOCIÓN DE MERCURIO CON UNA MEZCLA DE AZUFRE Y LIMONENO.....	22
PRECIPITACION QUIMICA.....	26
ADSORCION EN CARBON ACTIVADO PARA ELIMINAR MERCURIO.....	28
REMEDIACIÓN BIOLÓGICA DE MERCURIO .....	30
Biorremediación bacteriana de aguas residuales contaminadas con mercurio .....	31
Ficorremediación de mercurio .....	31
Fitorremediación de mercurio .....	32
ELECTRODIALISIS.....	34
ULTRAFILTRACIÓN .....	35
FILTRO CON MAGNETITA .....	39
FILTRO CON NANOPARTÍCULAS DE ORO .....	40
FILTRO CON ALGAS .....	40
COSTOS.....	42
CONCLUSIONES.....	48
RECOMENDACIONES. ....	49
BIBLIOGRAFIAS .....	50

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Retención de Hg(II) en Zeolitas. ....	10
<b>Figura 2.</b> Determinación de pH optimo.....	11
<b>Figura 3.</b> Eliminación fotocatalítica de Hg(II) de disoluciones acuosas.....	13
<b>Figura 4.</b> Ciclo de sorción – desorción .....	15
<b>Figura 5.</b> Procesos de coagulación-floculación .....	21
<b>Figura 6.</b> Esquema de la instalación para tratamientos de aguas contaminadas por minería .....	22
<b>Figura 7:</b> Esquema del proceso de filtración .....	24
<b>Figura 8.</b> Tipos de carbón activado .....	25
<b>Figura 9.</b> Esquema de las estrategias de remediación biológica de Hg y las más recientes y/o destacadas investigaciones que contribuyen al desarrollo y conocimiento del metabolismo y remoción del metal. ....	26
<b>Figura 10.</b> Proceso de osmosis inversa .....	29
<b>Figura 11.</b> Equipo industrial de ultrafiltración .....	33
<b>Figura 12.</b> Sistema de filtro de agua de ultrafiltración (Modelo AOK-505) .....	34
<b>Figura 13.</b> Composición de los cartuchos de ultrafiltración.....	35
<b>Figura 14.</b> Filtro UVW – 15 .....	38
<b>Figura 15.</b> Zeolita sintetica 4A.....	39
<b>Figura 16.</b> Zeolita natural Clinoptilolite.....	39
<b>Figura 17.</b> Sulfato férrico.....	40
<b>Figura 18.</b> Sulfato de Aluminio.....	40
<b>Figura 19.</b> Carbón Activado.....	40
<b>Figura 20.</b> Equipo de osmosis inversa industrial.....	41
<b>Figura 21.</b> Equipo osmosis inversa.....	42
<b>Figura 22.</b> Equipo con membranas de ultrafiltración.....	42
<b>Figura 23.</b> Equipo de electrodiálisis.....	43
<b>Figura 24.</b> Membrana para filtración .....	43

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Resinas de intercambio iónico .....	11
<b>Tabla 2.</b> Contaminantes reducidos en la coagulación.....	19
<b>Tabla 3:</b> características de agentes de precipitación habituales .....	23
<b>Tabla 4.</b> Lista abreviada de compuestos químicos, partículas y microorganismos retenidos por purificadores de agua a base de Osmosis Inversa.....	30
<b>Tabla 5.</b> Porcentaje retenido de ciertos elementos en la osmosis .....	30
<b>Tabla 6.</b> Ventajas, desventajas y soluciones a las alternativas de remoción de mercurio.....	43

## INTRODUCCION

La contaminación por mercurio, una problemática ambiental que en los últimos tiempos ha tomado cierto protagonismo a causa de los impactos que ocasiona. Los países en desarrollo son los más afectados cuando de contaminación en las fuentes hídricas se trata porque produce desastres en la salud humana, al acumularse en el cerebro y en riñones y con esto provocando enfermedades neurológicas, al igual, también en animales que lo consumen, como peces, están siendo afectados. Un estudio del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) refleja que gran parte de la exposición humana a este metal tóxico se produce a través del consumo de pescado contaminado.

Para detener la contaminación global con mercurio se ha formulado mecanismos de control y también mitigación. Entre los más destacados se encuentran: en enero del año 2013 Colombia se unió junto con más de 140 países aprobaron en Ginebra (Suiza) la puesta en marcha de la Convención de Minamata, una nueva normativa internacional vinculante bautizada con el nombre de la ciudad japonesa donde murieron cientos de personas en los años 50 intoxicadas con mercurio, a causa de esta convención hoy por hoy se conoce un síndrome llamado síndrome de Minamata, este síndrome inicia cuando el metal se acumula en el cerebro, afectando el sistema nervioso y neurológico de las personas. El Convenio de Basilea sobre el control de los Movimientos Transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, vigente en la comunidad Europea desde 1994 y el cual fue suscrito por Colombia en 1996, mediante la ley 253. Otro hecho destacable fue el informe, denominado Evaluación mundial sobre el mercurio de 2013, en este analizaron por primera vez el mercurio que se libera a ríos y lagos de todo el mundo, al igual que las principales fuentes de donde es proveniente este contaminante, que son: la combustión de carbono para generar energía eléctrica y la extracción de oro, MINAMBIENTE (2010).

En Colombia una de las principales fuentes antropogénicas de contaminación por mercurio la proporciona la extracción de oro en pequeña escala. A causa de esta actividad diversas zonas del país como Antioquia, especialmente en el bajo Cauca, han impactado de manera negativa y magnamente las fuentes hídricas, haciendo un vertido de 100 toneladas de mercurio en un año, Cárdenas H., Santiago (2014). Con estos vertidos tanto la comunidad de Antioquia está perjudicando su salud, al igual que diferentes zonas del país donde se comercializa el pescado contaminado proveniente de estos ríos.

Con lo anteriormente expuesto y por lógicas razones la ley colombiana en su constitución plasma que para aguas tratadas la máxima concentración de mercurio existente en ella es de 0,002 mg/L, MINAMBIENTE (2010). Por esto debemos tomar conciencia y analizar los procesos de potabilización por los que atraviesa el agua que está siendo contaminada por este metal y que posteriormente va ser consumida en nuestras casas. Con esto el objetivo principal de esta monografía es hacer una recopilación de información y exponer las diferentes alternativas existentes, desde las más convencionales hasta las más innovadoras, para remover el mercurio del agua.

## GENERALIDADES DEL MERCURIO

Cualquier catión que tenga un peso atómico superior a 23 (que corresponde al peso atómico del sodio) se considera un metal pesado. Entre ellos se puede destacar níquel, manganeso, plomo, cromo, cadmio, zinc, cobre, hierro y mercurio, entre otros. Todos ellos se encuentran catalogados como sustancias contaminantes que deben tenerse obligatoriamente en consideración para fijar valores límites de emisiones.

Respecto al mercurio sus principales características son:

- Único metal líquido a temperatura ambiente
- Color blanco plateado
- Densidad de 13.534 g/cm<sup>3</sup>
- Peso atómico de 200.59
- Punto de fusión de -38.86 °C
- Es un buen conductor eléctrico y comparándolo con otros metales es un mal conductor de calor
- Forma fácilmente aleaciones o amalgamas con el oro, la plata y el estaño
- La fuente natural de mercurio más importante a nivel económico es el cinabrio, un sulfuro cuyo contenido de mercurio alcanza el 85%
- La principal fuente antropogénica la constituyen los residuos industriales que se acumulan en los cuerpos de agua, los sedimentos y la atmósfera

## FORMAS DE ENCONTRARSE EL MERCURIO EN EL AGUA

Según Remtavares (2012), el mercurio es un contaminante que cuya toxicidad al estar presente en el agua varía con la especie química y con el tipo y tiempo de exposición a él. El mercurio puede existir en una gran variedad de formas químicas que incluyen:

- **Mercurio metálico:** Es la forma química menos abundante en la naturaleza. Es un metal de color plateado, líquido a temperatura ambiente que corresponde al elemento sin combinar, en estado de oxidación 0.
- **Mercurio inorgánico:** Entre los que se encuentran sulfuro de mercurio (HgS), cloruro mercúrico (HgCl<sub>2</sub>), óxido de mercurio (HgO), nitrato de mercurio (HgNO<sub>3</sub>), etc. Estas especies son mucho más abundantes en la naturaleza.
- Finalmente, la combinación del mercurio con carbono da lugar a los llamados **organomercuriales**, denominación que incluye una gran variedad de compuestos como metilmercurio, fenilmercurio, etc.

Según Moreno Antonio (2011), el mercurio en el agua encuentra principalmente en su forma inorgánica, las pruebas realizadas en plantas piloto demuestran que la remoción de mercurio inorgánico depende del pH y de la turbiedad del agua y tienen poca dependencia de la concentración de mercurio, cuando se encuentra entre 0,003 y 0,016 mg/L. De la forma inorgánica puede pasar a compuestos orgánicos por acción de los microorganismos presentes en el medio.

De los microorganismos puede trasladarse al plancton, a las algas y, sucesivamente, a los organismos de niveles tróficos superiores como los peces, las aves rapaces e incluso al hombre. Aunque generalmente el mercurio es vertido al ambiente en su forma metálica o inorgánica, puede ser transformado por diversos tipos de bacterias en metilmercurio, que se considera la forma química más tóxica del mercurio convirtiéndose en la forma más importante del mercurio orgánico, Moreno Antonio (2011).

## **RIESGOS EN LA SALUD**

Los efectos sobre la salud dependen de la vía de ingreso al organismo: inhalación, ingesta o contacto con la piel; la dosis y el tiempo de exposición; la edad y el sexo, siendo el feto y las mujeres más susceptibles; y la forma química del metal: elemental, orgánica o inorgánica, MINAMBIENTE (2010).

La exposición a niveles elevados puede provocar erupciones cutáneas, problemas mentales, malformaciones físicas del feto e incluso la muerte en casos de intoxicación extrema. En los niños, dependiendo del nivel de exposición al mercurio, puede presentarse una disminución en el coeficiente intelectual, en el desarrollo del sistema nervioso, retraso en el caminar y el hablar, falta de coordinación, ceguera y convulsiones. En los adultos, la exposición extrema puede conducir a cambios en la personalidad, temblores, cambios en la visión, sordera, pérdida de coordinación muscular, sensibilidad y memoria, deterioro intelectual, e incluso la muerte, MINAMBIENTE (2010).

Ahora el mercurio en su forma inorgánico puede causar insuficiencia renal y daño gastrointestinal. Las sales de mercurio son irritantes y pueden causar ampollas y úlceras en los labios y la lengua. Sarpullidos, sudoración excesiva, irritabilidad, temblores musculares, debilidad y alta presión arterial son otros síntomas de una exposición elevada

Como se había mencionado antes, el mercurio inorgánico es la principal forma en que se puede encontrar el mercurio en el agua, y este al pasar por procesos biológicos puede convertirse en metilmercurio que es la forma más tóxica y dañina para el consumo de los seres vivos. El metilmercurio es absorbido por el tracto digestivo y se distribuye por todo el cuerpo, se bioacumula fácilmente en el cerebro, donde puede permanecer durante un largo periodo de tiempo. El metilmercurio tiene efectos básicamente neurotóxicos y genotóxico. Como neurotóxicos, encontramos que el mercurio se puede transformar en alquilmercurio, que es la unión del mercurio con un grupo alquilo, en una mujer embarazada estos pueden atravesar la barrera placentaria y entrar a los tejidos del feto, acumulándose en el cerebro y tejidos de este y causando daños en el sistema nervioso central o malformaciones; también puede llegar al bebé por la leche materna. Además, también produce efectos nocivos en el sistema inmunológico, renal y cardiovascular. La asimilación de metilmercurio por parte de los seres vivos da lugar a procesos de bioacumulación y biomagnificación a través de la cadena trófica. Como resultado, tienen lugar importantes acumulaciones de metilmercurio en los peces de gran tamaño que consumimos habitualmente en nuestra dieta, siendo ésta la principal vía de exposición a mercurio en la mayoría de grupos de población. Por otra parte, el mercurio tiene gran afinidad por el azufre, se une fuertemente a grupos sulfhídricos de proteínas, incluyendo las enzimas. Se une a la hemoglobina y a la seroalbúmina, a través de los grupos – SH (tiol). La unión del Hg a la membrana celular puede inhibir el transporte activo de azúcar a través de la membrana y aumentar la permeabilidad a potasio produciendo daños irreversibles al sistema nervioso central, MINAMBIENTE (2010).



Uno de los síndromes más conocidos causados por el envenenamiento por mercurio es el **Síndrome de Minamata** -localidad en Japón donde murieron más de 400 personas intoxicadas por mercurio. El proceso inicia cuando el metal se acumula en el cerebro, afectando el sistema nervioso y neurológico de las personas. Produce insuficiencia cardiaca, renal, respiratoria, dermatitis y hasta impotencia sexual. Al igual que el metilmercurio el síndrome de Minamata es altamente perjudicial en las mujeres embarazadas, puede provocar abortos y malformaciones en sus fetos.

## **MARCO LEGAL**

MINAMBIENTE (2010), en la constitución Colombia la política ambiental está basada en las siguientes legislaciones:

- El Decreto 2811 de 1974 que dicta el Código Nacional de Recursos Naturales.
- La Ley 9 de 1979 por la cual se dictan medidas sanitarias, sanciones y prohibiciones.
- El Código de los Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
- La Constitución Nacional de 1991.
- La Ley 99 de 1993, por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente.

## **LIMITES PERMISIBLES DE MERCURIO, MINAMBIENTE (2010)**

**Decreto 1594 de 1984**, por el cual se reglamenta los usos del agua y residuos líquidos:

**Art. 38.** Los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para consumo humano y doméstico son los que se relacionan a continuación, e indican que para su potabilización se requiere solamente tratamiento convencional: Mercurio 0,002 mg/L

**Art. 39.** Los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para consumo humano y doméstico son los que se relacionan a continuación, e indican que para su potabilización se requiere solo desinfección: Valor de referencia Mercurio 0,002 mg/L

**Art. 41.** Los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para uso pecuario, para el Mercurio 0,01 mg/L.

**Decreto 1575 de 2007**, Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Reemplaza al Decreto 475 de 1998.

**Resolución 2115 de 2007**, por el cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Mercurio 0,001 mg/L

## ALTERNATIVAS PARA REMOVER MERCURIO DEL AGUA

### ELIMINACION DE MERCURIO POR MEDIO DE RESINAS INTERCAMBIADORAS DE IONES

**Intercambio iónico:** consiste en el proceso de remover los iones que son despreciados en el agua cruda que se encuentran presentes, lo que hace es transferirlos a un material solido llamado intercambiador iónico, que los acepta y cede un número equivalente de iones de una especie que si es deseada en el agua cruda que está siendo tratada. Los iones que son cedidos o transferidos se encuentran en el esqueleto del intercambiador iónico, Dardel (2016).

Los intercambiadores iónicos son sustancias granulares insolubles, las cuales presentan en su estructura molecular (esqueleto) ciertos radicales ya sean ácidos o básicos que son los que cumplen con el propósito de poder intercambiarse. Los iones que están fijados en estos radicales, sean positivos o negativos, serán reemplazados por iones del mismo signo en solución en el líquido que se encuentra en contacto con ellas. El resultado neto es que cada equivalente de sal es reemplazado por un mol de agua, Dardel (2016).

Los intercambiadores iónicos son usados para la separación de sales (cationes y aniones) del agua, las siguientes son las aplicaciones que presentan para la potabilización del agua, Dardel (2016):

- Ablandamiento – separación de iones de calcio (Ca) y magnesio (Mg)
- Desmineralización – separación de parte de todos los iones del agua
- Separación del  $\text{NH}_4$  del agua
- Cambiador de ion – catión para la separación de metales pesados

Las sustancias intercambiadoras de iones son casi exclusivamente resinas. En la actualidad existes dos clases de tipos de resinas, las que son tipo gel y las que son tipo macroporosas. La diferencia existente entre ellas está básicamente en sus porosidades, siendo que las de tipo gel presentan una porosidad natural limitada entre molécula y molécula (microporos) y las resinas que son tipo macroporos poseen una porosidad artificial adicional que es obtenida por sustancias que se le adicionan para este fin, (Maita, 2008; Ahalya et al., 2003).

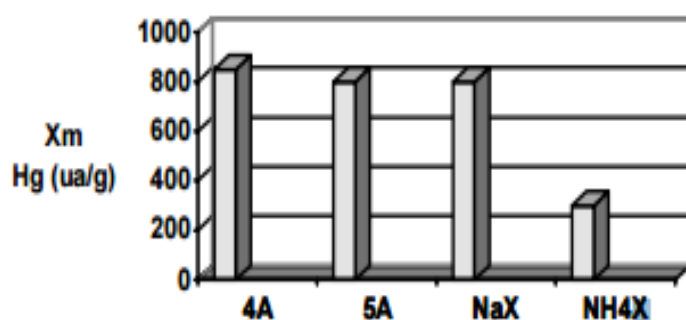
Para poder eliminar metales pesados que se encuentren diluidos en soluciones o en agua cruda que será tratada, las resinas de intercambio iónico resulta una alternativa aplicable. Los tipos de resinas que se pueden emplear en este caso son resinas de intercambio catiónico, las cuales se clasifican en fuertemente o débilmente ácidas. Normalmente los iones hidrógeno de la resina, se cambian por los cationes, y los iones hidroxilo de la resina se cambian por los aniones. Los iones hidrógeno e hidroxilo se combinan, formando agua pura. El proceso también es rápido y reversible (Maita, 2008; Ahalya et al., 2003).

Según Jackelin Reinoso (2010), se ha probado experimentalmente que las resinas de intercambio iónico son efectivas en la remoción de mercurio hasta 98%, tanto en la forma orgánica como inorgánica.

A continuación se presenta algunas de las alternativas de resina para eliminación selectiva de mercurio en el agua en base a investigaciones realizadas:

Una de las alternativas son las zeolitas, esta clase de resina son sólidas con una estructura cristalina bien definida; pueden ser sintéticas y naturales. Las zeolitas naturales las podemos encontrar en diferentes entornos geológicos, y son formadas de materiales precursores tales como ceniza volcánica, arcilla, feldespatos, sílice biogénica, y formas de cuarzo. Entre ellas, las más abundantes parecen ser la mordenita, clinoptilolita, erionita, chabazita, phillipsita y analcita.

En la bibliografía se encontró un estudio realizado en Concepción (Chile) donde utilizaron diferentes clases de zeolitas para remover Cr(III) Y Hg(II), las diferentes zeolitas, tanto sintéticas como naturales, fueron utilizadas con la finalidad de mirar cual de todas es la más eficiente al momento de remover concentraciones en el agua de estos elementos. Usaron zeolitas sintéticas 4A y NaX; zeolitas naturales cubanas (70% de clinoptilolita), mexicana (80% de erionita) y chilena (mezcla de mordenita y clinoptilolita). Se estudió en condiciones normalizadas la velocidad y capacidad de retención de Cr(III) y Hg(II) en las zeolitas indicadas y mediante un diseño factorial fraccional se estudió la influencia de algunos parámetros del intercambio: temperatura ( $T = 30-50^{\circ}\text{C}$ ), concentración ( $C: 200-400 \text{ ppm}$ ), tamaño de partícula ( $t_p = 0.5-1.5 \text{ mm}$ ) y pH del medio ( $\text{pH} = 3.5-4.8$ ). Algunos de los resultados obtenidos de la remoción de mercurio se presentan en la figura 1.



**Fuente:** <http://www.zeocat.es/docs/aguacrhg.pdf>

**Figura 1.** Retención de Hg(II) en Zeolitas.

Los resultados y conclusión que les arrojó el estudio muestran que al variar los parámetros del intercambio se observan fuertes cambios en la velocidad inicial y en el % de retención alcanzado después de algunas horas. El pH es la variable de más incidencia en la retención. De los dos tipos de zeolitas utilizadas (naturales y sintéticas) la que mejor arrojó resultados en la velocidad inicial de retención y la cantidad total intercambiada de iones fueron las zeolitas sintéticas y en las zeolitas naturales la de mejor comportamiento de adsorción fue la zeolita cubana clinoptilolita.

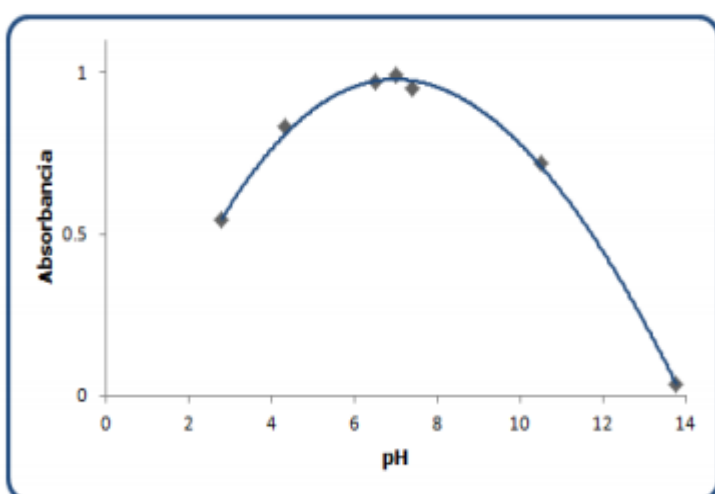
En la universidad de Heiwan del Cairo, ubicada en Egipto, el investigador Sayed (1996) trabajaron con zeolita A y una resina orgánica (NaDNNS), para remover iones metálicos potencialmente tóxicos tales como,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{V}^{+2}$ ,  $\text{Cd}^{+2}$  y  $\text{Hg}^{+2}$ , de aguas residuales proveniente de la industria de textiles. En el estudio comparativo que realizaron entre los dos tipos de resinas de intercambio iónico tuvieron en cuenta lo siguiente: cinética, temperatura, resistencia iónica y efecto del pH. De acuerdo a estos resultados y principalmente al estudio cinético, concluyó que la resina orgánica (NaDNNS) es un intercambiador más eficiente que la zeolita A para estos metales.

Melamed y Luz, (2006) realizaron testes con attapulgitas, zeolitas, caolín, vermiculitas y bentonitas. Los resultados demostraron la relativamente alta eficiencia de las zeolitas en la remoción del mercurio. Según el estudio las zeolitas son capaces de remover especies de mercurio de efluentes con concentraciones de hasta 1000 ppm, correspondiendo a una capacidad de adsorción de 10.000 mg Hg/ kg.

Una investigación realizada por Cecilia De Asmundis, César H. Romero, Hugo A. Acevedo, Roberto G. Pellerano y Francisco A. Vázquez, Argentina, consistió en la funcionalización de una resina aniónica (Resina estirendivinilbencenica, Dowex 1X8) con un reactivo (difenilcarbazida) específicamente adecuado para la determinación y retención de iones Hg(II) en soluciones acuosas. En la investigación llevaron a cabo el ajuste de las condiciones para la determinación del complejo Hg-DFC, con estos ajustes lograron obtener un método eficaz, rápido y de bajo costo para detectar concentraciones de Hg en matrices complejas, mediante la realización de espectrofotometría de absorción UV-Vis en fase sólida.

En el documento consultado hacen las siguientes observaciones sobre la resina tratada: La resina puede ser utilizada para preconcentrar Hg(II) durante el pre-tratamiento para el análisis con métodos instrumentales específicos (absorción/emisión atómica), la intensidad del color desarrollado por la resina funcionalizada se encuentra estrechamente ligada con las concentraciones de Hg(II) presentes en las muestras, lo que conduce a que el método pueda realizarse aún si no se tiene el equipamiento necesario, aplicando técnicas semi-cuantitativas como, colorimetría visual

De los resultados obtenidos en la investigación se resaltan lo siguiente: De los ensayos realizados se registró la máxima absorbancia en pH cercanos a 7, en donde el color desarrollado por el complejo es violeta. Por encima o por debajo de dicho pH el desarrollo del color del complejo es muy débil o inexistente, con lo que puede inferirse que no se produce la reacción deseada. Los resultados se muestran en la figura 2, donde se concluyeron que uno de los principales factores que gobiernan la formación del complejo Hg-DFC es la regulación de pH en las muestras.



**Fuente:** [http://www.exeedu.com/publishing.cl/av\\_cienc\\_ing/2011/Vol2/Nro1/6-AC11042-10-full.pdf](http://www.exeedu.com/publishing.cl/av_cienc_ing/2011/Vol2/Nro1/6-AC11042-10-full.pdf)

**Figura 2.** Determinación de pH óptimo

Una de las resinas utilizadas en diversas industrias donde se presentan concentraciones y contaminación por mercurio utilizan la resina específica Ambersep™ GT74 para la eliminación selectiva de este compuesto.

## **FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA CON DIÓXIDO DE TITANIO**

Como alternativa de los tratamientos convencionales para el saneamiento de aguas contaminadas, surge la fotocatalisis. Desde el 1976 se tiene conocimiento de la aparición de este método para la descontaminación de aguas con la publicación de Carey (J.H. Carey, J. Lawrence y H.M. Tosine, Bull. Environ. Contam. Toxicol).

Pero es hasta mediados de los 80 y principios de los 90, después de investigaciones y publicaciones donde se plantea aplicar este tratamiento para aguas contaminadas, como lo plasma Blanco. J (2001) en las cuatro fases de la evolución del proceso fotocatalítico para la purificación del agua. Ya a principios de los años 2000 se tienen resultados concretos y específicos de la aplicación de este método, siendo este muy viable en la descontaminación del agua.

El proceso de catálisis consiste en la alteración de la velocidad de una reacción química, producida por la presencia de una sustancia adicional llamada catalizador, que no resulta químicamente alterada en el transcurso de la reacción.

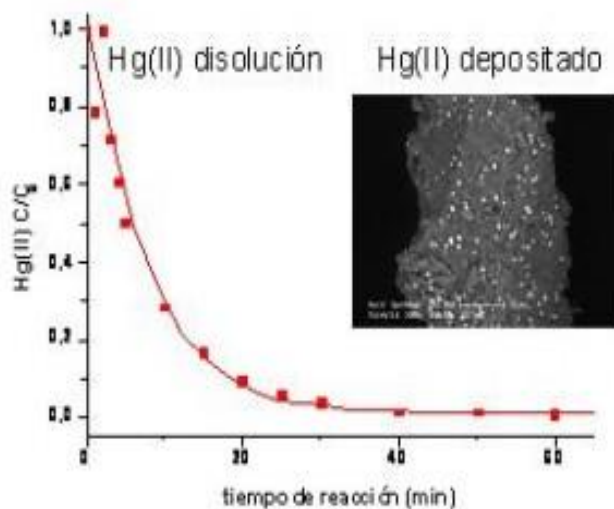
Cuando se habla de fotocatalisis, se hace referencia a una reacción catalítica que involucra la absorción de luz por parte de un catalizador. Y aún más específicamente, se dice que el proceso es de fotocatalisis heterogénea cuando las fotorreacciones transcurren en la superficie del catalizador.

Este último proceso permite la degradación e incluso mineralización de contaminantes orgánicos recalcitrantes presentes en el agua o en el aire tanto biológico como no biodegradable. Esto se logra a través de la excitación de un sólido fotocatalizador sumergido en una solución, mediante la absorción de energía radiante (visible o UV), lo que origina reacciones simultáneas de oxidación y reducción en diferentes zonas de la región interfacial. Se trata básicamente de la transferencia de carga a través de la interfaz formada entre el semiconductor iluminado y la solución acuosa, Emilia Campagnon (2016).

Con lo anteriormente expuesto y tomándolo como base para tener conocimiento del método, nos enfocamos ahora sí en el proceso de fotocatalisis heterogénea con dióxido de titanio, la cual es una técnica muy prometedora para la descontaminación de aguas con mercurio.

Los procesos fotocatalíticos se desarrollan mediante la irradiación de la disolución acuosa de mercurio en la que se suspende el fotocatalizador. Se ha podido comprobar según Remtavares (2012), que aplicando el tratamiento fotocatalítico, es posible disminuir la concentración de Hg(II) en disolución acuosa desde 100 ppm hasta valores por debajo de 100 ppb, como se observa en la figura 3.

El mercurio eliminado de la disolución queda depositado en forma de mercurio metálico y calomelano sobre la superficie del catalizador empleado, a partir del cual puede recuperarse fácilmente. Además la posibilidad de utilizar radiación solar en el proceso de irradiación añade beneficios ambientales al proceso, ya que permite aprovechar una forma de energía ampliamente disponible, Remtavares (2012).



**Fuente:** <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2012/04/27/131762>

**Figura 3.** Eliminación fotocatalítica de Hg(II) de disoluciones acuosas.

En la fotografía de microscopía (figura 3.) electrónica de barrido se muestra la deposición del mercurio metálico sobre el catalizador.

Ahora, ¿Por qué el dióxido de titanio sería la mejor opción como catalizador?

- Tiene buena eficiencia fotocatalítica
- El aporte de energía necesario es pequeño, de 30 a 80° C y la variación de esta no afecta el proceso
- El proceso es capaz de destruir cualquier sustancia orgánica, incluidas mezclas completas
- Es el único método que destruye sustancias tóxicas hasta complejos totalmente inocuos
- Es económico, a comparación de otros catalizadores
- No presentan subproductos
- Es abundante en la tierra
- Tiene baja toxicidad

### **ELIMINACION DE METALES PESADOS DE AGUAS CONTAMINADAS MEDIANTE ADSORCION SELECTIVA CON MATERIALES MESOESTRUCTURADOS HIBRIDOS**

El desarrollo de los materiales mesoestructurados se inició durante la última década del siglo XX, tras la obtención de los materiales silíceos FSM, sintetizados por Yanagisawa y col.

Los materiales mesoestructurados se caracterizan por tener una elevada superficie específica y una estrecha distribución de tamaño de poro, que resulta de un sistema ordenado de mesoporos de simetría definida. La obtención de estas estructuras porosas es posible gracias al empleo de tensoactivos que actúan como agentes directores de la estructura para formar los canales de poros que caracterizan a estos materiales, SANZ P., Eloy; ARENCIBIA, Amaya; SANZ, Raúl; CALLEJA, Guillermo (2012)

Los materiales mesoestructurados silíceos pueden ser adsorbentes debido a que presentan poros uniformes y ordenados, además de una elevada superficie específica.

En los últimos años se ha venido trabajando en la búsqueda de nuevas alternativas tecnológicas para tratar aguas contaminadas, especialmente industriales, esto con el propósito de poder estar entre los valores límites admisibles que dicta la legislación al ver que el empleo de estos metales pesados en minería, agricultura e industria están sobrepasando estos límites con su uso desmesurado. Una de las técnicas que se ha venido mostrando muy eficaz, a través de estudios y experimentos, es la adsorción selectiva con materiales mesoestructurados funcionalizados con grupos orgánicos, esta técnica es muy eficaz para eliminar de forma selectiva diferentes especies metálicas presentes en las aguas. Estos materiales presentan una excelente eficiencia porque la estructura silícea presenta una muy buena propiedad porosa y también se debe a la modificación que se presenta en la superficie debido a los grupos orgánicos quelantes que interaccionan de forma específica con determinados metales. De esta manera es posible diseñar adsorbentes específicos de cada metal simplemente seleccionando de forma adecuada el grupo orgánico que se incorpora en la matriz inorgánica, Remtavares (2013).

Con las diferentes investigaciones y resultados obtenidos se ha concluido que los materiales mesoestructurados que contienen azufre orgánico son ideales adsorbentes de mercurio (esto es importante al incluirse como otra técnica eficaz para la potabilización de aguas contaminadas con mercurio) llegando a retener hasta 4 mmol de Hg(II) por gramo en el proceso de adsorción, siendo además fácilmente regenerables mediante regeneración química, Remtavares (2013).

## **BIOMASA RESIDUAL PARA LA REMOCION DE MERCURIO**

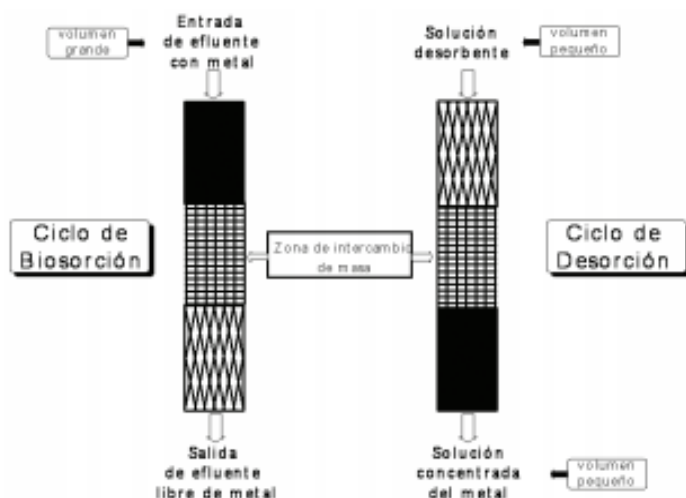
La bioadsorción es un fenómeno físico mediante el cual el sólido se adhiere a la superficie de materiales orgánicos vivos o inertes, este proceso se caracteriza por la unión rápida y reversible de ciertos iones a la superficie del bioadsorbente, Tejada, C.; Villabona, Á.; & Ruiz, V. (2012).

Según L. F. Sala, S. I. García, J. C. González, M. I. Frascaroli, et al (2010), el proceso de biosorción es adecuado como técnica de refinamiento en aguas de desecho con metales pesados, en concentraciones en un rango de 1 a 100 ppm. Así, estos niveles se logran disminuir hasta aquellos correspondientes al agua potable, utilizada en el consumo diario de personas y animales.

El procedimiento para la utilización de la biomasa en la descontaminación de aguas con metales pesados es el siguiente:

La biomasa suele ser pre-tratada por lavado con ácidos y/o bases, antes de secada y molida. El corte y/o pulverización y granulación de la biomasa seca puede dar lugar a partículas estables, aunque algunos tipos de biomasa deben ser inmovilizados en una matriz polimérica y/o se injertan en un soporte inorgánico, para obtener partículas con las propiedades mecánicas requeridas. Las partículas pueden empaquetarse en columnas, que operan en ciclos de carga, regeneración y lavado, siendo más efectivas para la eliminación continua de metales pesados. La operación comienza con la carga del material sorbente, luego se hace pasar el efluente y el metal es captado por el biosorbente. Cuando la capacidad de sorción del biosorbente se agota, la columna se retira y su relleno es regenerado con soluciones de ácidos o de bases. L. F. Sala, S. I. García, J. C. González, M. I. Frascaroli, et al (2010).

En la figura 4 da una idea simplificada del proceso que hoy se conoce como descarga cero donde se llevan a cabo múltiples ciclos de sorción-desorción



**Fuente:** L. F. Sala, S. I. García, J. C. González, M. I. Frascaroli, et al (2010).  
**Figura 4.** Ciclo de sorción - desorción

El uso de biomasa residual para la remoción de metales pesados es una alternativa que ha tenido aplicación durante los últimos años debido a que es una opción económica y eficiente y que tiene posibilidades en la aplicación industrial.

El artículo realizado por Tejada, C.; Villabona, Á.; & Ruiz, V. (2012) nos presentan una revisión bibliográfica sobre tipos de biomasa para remover mercurio y cadmio. En esta publicación llegaron a ciertas conclusiones las cuales se muestran a continuación:

“Se encontró que los bioadsorbentes pretratados químicamente presentan mayor porcentaje de remoción que los que no han sido modificados, la biomasa con mejores resultados fue la cascara de arroz, para el mercurio, modificada con ácido sulfúrico con una remoción de 384,6 mg/g, y para el cadmio, modificada con álcalis con una remoción de 125,94 mg/g. Además, la cinética del proceso de adsorción, en la mayoría de los experimentos, es regida por la ecuación cinética de pseudo-segundo orden.”

Aquí se presentan las diversas alternativas de biomasa que se podrían utilizar para remover mercurio:

#### Remoción de mercurio con biomasa residual

##### 1) Adsorción de Mercurio utilizando helechos arborecenses

Ho y Wang (2008), estudiaron el comportamiento de adsorción de mercurio en soluciones acuosas, utilizando Helechos Arborecenses. Se encontró que la capacidad de adsorción depende de la temperatura, ya que al aumentarla, también aumenta la capacidad de adsorción. La máxima adsorción fue de 26.5 mg/g a una temperatura de 25° C.

##### 2) Remoción de Mercurio utilizando corteza de eucalipto

En este estudio se propone la utilización de la corteza de eucalipto (*eucalyptus camaldulensis*) como un bioadsorbente para la eliminación de Hg (II) en soluciones acuosas. Las variables de funcionamiento estudiadas fueron dosificación de adsorbente, fuerza iónica, velocidad de agitación, temperatura, pH de la solución, tiempo de contacto, y concentración inicial del metal. Los experimentos indicaron que la capacidad de adsorción era dependiente de las variables de operación y el proceso era fuertemente dependiente del pH.



La máxima adsorción registrada fue de 33.11mg/g a 20°C (Ghodbane & Hamdaoui, 2008)

**3) Remoción de mercurio en soluciones acuosas utilizando Guayaba Manzana (*Psidium guajava*)**

Se investigó la biosorción de Hg (II) mediante el uso de polvo de corteza de guayaba. Para la investigación utilizaron un sistema por lotes, y se analizaron los efectos de diversos parámetros como tiempo de contacto, concentración inicial, pH y temperatura. Se encontró que la eliminación de Hg (II) es dependiente del pH, encontrándose la máxima adsorción a un pH de 9.0. La adsorción máxima fue de 3.364 mg/g alcanzándose a los 80 min, mostrándose que el polvo de corteza de guayaba puede ser utilizado eficientemente como una alternativa de bajo costo para la eliminación de mercurio divalente a partir de soluciones acuosas (Lohani, Singh, Rupainwar, & Dharc, 2008).

**4) Adsorción de mercurio con madera de Papaya**

Basha et al., (2009), evaluaron la adsorción de Hg (II) en solución acuosa en condiciones variables de tiempo de contacto, concentración de ion metálico, dosis adsorbente y pH. Los resultados indican que el equilibrio de adsorción se estableció en aproximadamente 120 min. La adsorción de Hg (II) fue estrictamente dependiente del pH, y la eliminación máxima de 70.8 mg/g se observó a un pH de 6,5.

Este trabajo ilustra una solución alternativa para la utilización del árbol de papaya, el cual es desechado cuando finaliza su vida útil. Por lo tanto, su uso para la eliminación de metales pesados de las aguas contaminadas puede ser una alternativa novedosa y rentable.

**5) Remoción de Mercurio en efluentes industriales utilizando espigas de arroz**

Rocha, Morozin, Da Silva y Da Silva (2009), llevaron a cabo experimentos de adsorción utilizando espiga de arroz como un biosorbente de iones de Hg (II) en soluciones acuosas a temperatura ambiente. Para lograr las mejores condiciones de adsorción se investigó la influencia del pH y el tiempo de contacto. Este proceso de adsorción fue rápido alcanzando el equilibrio antes de 90 minutos, con un máximo a pH 5,0.

La máxima capacidad de adsorción de iones metálicos de Hg (II) fue de 0,110 mmol/g. Además, se mostró un excelente resultado con el uso de la espiga de arroz como bioadsorbente de iones metálicos de mercurio en efluentes industriales.

**6) Remoción de mercurio en soluciones acuosas utilizando desechos de Ceiba pentandra, *Phaseolus aureus* y *Cicer arietinum***

La Ceiba Pentandra (Ceiba), el *Phaseolus Aureus* (Judía) y *Cicer Arietinum* (Garbanzo), son árboles y plantas que crecen en la india, principalmente en zonas de temperaturas altas. La cascara de la semilla de la Ceiba, de la Judía y los desechos de la cosecha del Garbanzo, son residuos agrícolas que pueden ser utilizados como bioadsorbentes en soluciones acuosas (Madhava, Kumar, Venkateswarlu, & Seshaiyah, 2009).

Este estudio se realizó en un proceso por lotes, además se analizó la influencia de parámetros como el pH, el tiempo de contacto, la concentración inicial de iones de mercurio y la dosis de absorbente. Con una concentración inicial de Hg(II) de 40 mg/l se obtuvo una remoción máxima de 25.88 mg/g para la cascara de semilla de Ceiba, 23.66mg/g para la cascara de Judía y 22.88 mg/g para los residuos de Garbanzo.

Un reciente descubrimiento revelado es el **uso del cilantro como una nueva forma económica de purificar el agua potable, al eliminar metales pesados**, según se reveló en la 246 Reunión Nacional y Exposición de la Sociedad Química Americana, que se celebró en Indianápolis, Estados Unidos. También conocido como perejil tailandés, se muestra como una promesa “bioadsorbente” para eliminar el plomo y otros materiales potencialmente tóxicos de metales pesados en el agua contaminada.

Douglas Schauer (2013), encargado de presentar la investigación realizada por estudiantes universitarios, señaló lo siguiente en la presentación de la investigación: “El cilantro puede parecer demasiado caro para su utilización en la descontaminación de grandes cantidades de agua para beber y cocinar. Sin embargo, el cilantro crece de forma silvestre en grandes cantidades en los países como México que tienen problemas con la contaminación del agua por metales pesados, por lo que es fácilmente disponible, barato y se muestra prometedor para la eliminación de ciertos metales, como el plomo, el cobre y el mercurio, que pueden ser perjudiciales para la salud humana.”

El secreto del cilantro puede estar en la estructura de las paredes exteriores de las células microscópicas que componen la planta, ideal para la adsorción de los metales pesados. A nivel de potabilización esta alternativa puede utilizarse en filtros para remover el mercurio.

#### Remoción de Mercurio con biomasa modificada químicamente

- 1) Remoción de mercurio en soluciones acuosas utilizando cascara de arroz modificada

El-Shafey (2010) preparó un material carbonaceo a base de cascarilla de arroz modificada químicamente con ácido sulfúrico. La adsorción de Hg en solución acuosa se estudió variando el pH, la concentración del ion metálico, la temperatura y el estado del absorbente (húmedo o seco). El estado de equilibrio de la adsorción se presentó a las 120 h, dando un mejor resultado el adsorbente húmedo. La capacidad de adsorción aumentaba con el pH, encontrándose una adsorción máxima de 384.6 mg/g.

- 2) Remoción de Mercurio con carbón activado de cáscara de nuez

En este trabajo se determinó la capacidad de adsorción de un carbón activado en polvo (PAC) derivado de la cáscara de nuez para la remoción de mercurio (Hg II) presente en aguas industriales, en un intento de producir adsorbentes más económico y eficaces. La adsorción de Hg (II) a partir de soluciones acuosas se llevó a cabo en diferentes condiciones experimentales, variando el tiempo de tratamiento, la concentración de iones metálicos, el pH y la temperatura de la solución.

Se demostró que la adsorción disminuye al aumentar el pH de la solución. También se utilizaron dos tipos de adsorbentes derivados del mismo material: Carbon A y Carbón B, con los cuales se obtuvo una remoción de 151.5 y 100.9 mg/g de mercurio respectivamente (Zabihi, Haghghi-Asl, & Ahmadpour, 2010).

### 3) Remoción de Mercurio utilizando cascara de pistacho y residuos de regaliz modificados

En la investigación realizada por Kaghazchi, Asasian, & Soleimani, (2010), tratan de aplicar una combinación de dos tipos de residuos agrícolas para producir un nuevo adsorbente, en este estudio se dedicó a investigar los detalles del proceso de adsorción de mercurio del medio acuático por el adsorbente Mix-ZC (muestra preparada por la activación química de una mezcla de cáscaras de nueces de pistacho y residuos de regaliz impregnado con cloruro de zinc), con el que se hicieron una serie de experimentos por lotes. Este adsorbente produjo una remoción máxima de 147.1 mg/g a un pH de 8 y a temperatura ambiente. (Neda, Tahereh, & Mansooreh, 2012).

## REMOCIÓN DE MERCURIO CON UNA MEZCLA DE AZUFRE Y LIMONENO

Uno de los descubrimientos más recientes, a nivel científico, utilizado para la remoción de mercurio en el agua fue el realizado por los investigadores de la Universidad Flinders University en Australia en el 2015. Este descubrimiento, aunque fue por accidente, consiste en una mezcla de limoneno con azufre, esta mezcla produce una formación de un material “amistosa” pegajosa, similar al plástico o caucho viscoso, siendo el resultado un material de caucho pegajoso de color rojo, capaz de capturar y eliminar el mercurio del agua.

Esta mezcla es fácil y económica de realizar. El limoneno se extrae del aceite ubicado en las cascara de naranja y del limón, al igual que en las industrias de cítricos y por otro lado el azufre se produce en grandes cantidades como subproducto de actividades derivadas de la extracción del petróleo.

Los “Estudios toxicológicos” que se llevaron a cabo demuestran que la mezcla roja es inofensiva, y puede ser utilizada ampliamente y no constituye ninguna amenaza para el medio ambiente, la salud ambiental y la salud humana, y esto hace que este material sea utilizable en aguas contaminadas con mercurio.

Destaca el Dr. Justin Chalker (2015), investigador en cabeza del descubrimiento, que este material puede introducirse en la fabricación de filtros de agua y en cualquier área donde se desee eliminar el mercurio de las fuentes hídricas.

Además, al tocar o absorber el mercurio, el color rojo de este material se cambiara, y esto viene siendo como un indicativo que permite su uso revelando la presencia de mercurio en el agua, al igual que para identificar los sitios y fuentes de agua contaminada.

## COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN PARA ELIMINAR MERCURIO DEL AGUA

En el agua cruda existen materias en suspensión con una variabilidad de tamaños y de densidades que por consiguiente pueden ser eliminadas por medio de la sedimentación, pero existen casos donde ocurre lo contrario, el tamaño y la densidad de estas partículas son tan pequeñas que tienden a permanecer en suspensión y al igual poseen una carga eléctrica superficial que hacen provocar una repulsión constante, impidiendo con esto la aglomeración y formación de partículas más pesadas que si puedan sedimentar. Estas partículas, que tienen una dimensión de un rango de  $1\mu\text{m}$  y  $0,2\mu\text{m}$  son denominadas partículas coloidales.

El proceso de coagulación – floculación consiste en añadir compuestos químicos al agua con la finalidad de reducir las fuerzas que separan a los sólidos suspendidos los cuales en su tamaño son menores a  $10\mu\text{m}$  (estos sólidos pueden ser orgánicos e inorgánicos) para que formen aglomerados que sean removidos del agua por sedimentación, Nancy Vera (2007).

El proceso se lleva a cabo en 2 etapas. La primera etapa encontramos la coagulación, es el proceso de desestabilización de las partículas coloidales con objeto de anular o disminuir las fuerzas de repulsión existentes entre ellas.

La coagulación en el proceso de tratamiento del agua tiene por objeto preparar a las partículas dispersas en el agua (mediante la anulación de las cargas superficiales) para lograr posteriormente otras partículas más voluminosas y pesadas que puedan ser separadas más fácilmente del agua, lo cual hace parte del segundo proceso que es la floculación.

**Tabla 2.** Contaminantes reducidos en la coagulación

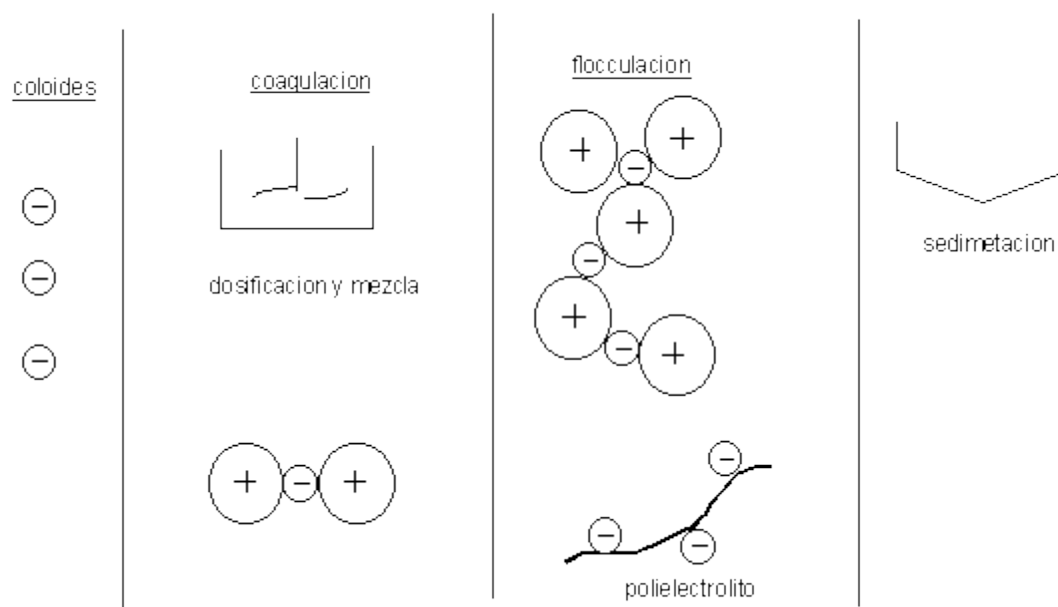
**Fuente:** <http://www.elaguapotable.com/coagulacion-floculacion.htm>

EFECTOS DE LA COAGULACIÓN SOBRE LAS SUSTANCIAS CONTENIDAS EN EL AGUA	
PARAMETROS	REDUCCIÓN MÁXIMA OBTENIDA MEDIANTE LA COAGULACIÓN:
	0: Nada de reducción
	+: de 0 a 20% de reducción
	++: 20 a 60% de reducción
	+++: > 60% de reducción
<b>MINERALES</b>	
TURBIDEZ	+++
MATERIAS EN SUSPENSIÓN	+++
FOSFATOS ( $\text{P}_2\text{O}_5$ )	+++
NITRATOS	0
AMONIO	0
CLORUTOS	0, +
SULFATOS	0, +
FLUORUROS	++
HIERRO	+++
ALUMINIO	+++
MANGANESO	+
COBRE	+++
ZINC	++
COBALTO	0

NIQUEL	0
ARSÉNICO	`+++As <sup>+5</sup> , ++As <sup>+3</sup>
CADMIO	++, +++
CROMO	`+Cr <sup>+6</sup> , +++Cr <sup>+3</sup>
PLOMO	+++
MERCURIO	++
CIANUROS	0
<b><u>ORGÁNICOS</u></b>	
COLOR	+++
OLOR	0, +
DQO	+++
COT	+++
DBO	+++
N KJELDHAL	+++
FENOLES	0
HIDROC. AROMÁTICOS POLICICLICOS	++
PESTICIDAS	+++
AGENTES DE SUPERFICIE (REACCIONANDO AL AZUL DE METILENO)	0,+
<b><u>MICROORGANISMOS</u></b>	
VIRUS	+++
BACTERIAS	+++
ALGAS	++

En la tabla anterior se presenta los efectos de reducción de concentraciones de la coagulación sobre sustancias contenidas en el agua, donde observar que la reducción máxima obtenida del mercurio mediante la coagulación es del 20 a 60% en condiciones normales.

En la floculación las colisiones existentes entre las partículas favorecen al crecimiento de flóculos que pueden sedimentarse. Para poder ocasionar esto en la planta potabilizadora o en la práctica de laboratorio primero se hace un mezclado rápido en el que se adiciona un coagulante y este forma una solución homogénea con el agua y con esto favorecer su contacto con las partículas en suspensión, posteriormente se efectúa una mezcla lenta con la finalidad de que con las partículas ya desestabilizadas, aumentar el tamaño de los flóculos ya formados como se muestra en la figura 5. Puede ocurrir que el flóculo formado por la aglomeración de varios coloides no sea lo suficientemente grande como para asentarse con la rapidez deseada, por ello es conveniente utilizar productos coadyuvantes de la floculación. Los fluculos formados finalmente son eliminados por medios físicos como la sedimentación, flotación o filtración.



**Fuente:** <http://www.elaguapotable.com/coagulacion-floculacion.htm>  
**Figura 5.** Procesos de coagulación-floculación

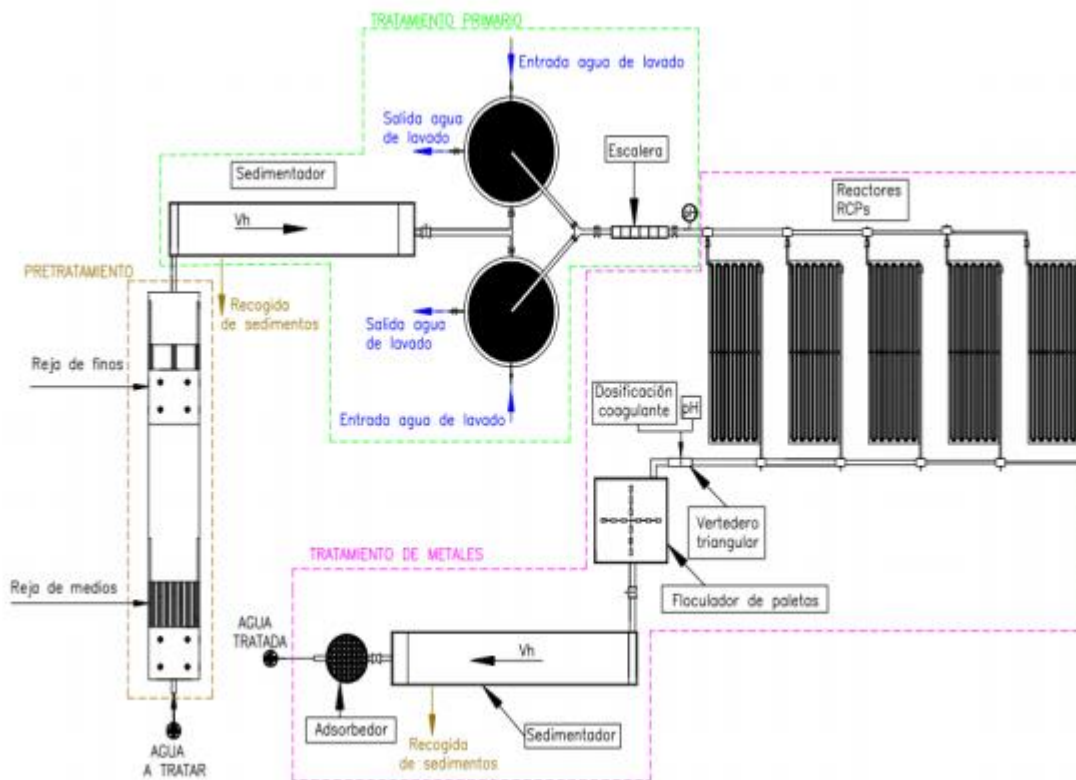
Los contaminantes que se eliminan con este proceso son aquellos que poseen un alto peso molecular. De esta forma, se eliminan sólidos suspendidos, color aparente, material coloidal, algunos precursores de trihalometanos y moléculas grandes que se adsorben poco en carbón activado. La coagulación – floculación no sirve para eliminar compuestos orgánicos solubles.

En términos de eliminar o disminuir las concentraciones de mercurio en el agua, que es la base de esta presentación, experimentalmente se ha comprobado que el tratamiento convencional de coagulación–filtración mediante aluminio o sulfato férrico puede remover entre 70 y 80% de mercurio inorgánico en aguas crudas turbias. Sin embargo, en aguas claras la remoción de mercurio puede reducirse a la mitad o menos (Quím. Ada Barrenechea Martel).

En el proceso de coagulación-floculación el mercurio, en solución se adsorbe a la superficie de partículas sólidas en suspensión y posteriormente en la coagulación estos coloides se agrupan formando flóculos de mayor tamaño, los cuales son removidos mediante precipitación o filtración.

Según Antonio Moreno (2011), la coagulación con sulfato férrico (17 mg/L) probó ser 66% efectiva con pH 7 y 97% con pH 8 para la remoción de mercurio. El sulfato de aluminio es menos eficiente y logra solamente 38% de efectividad a pH 8. La turbiedad desempeña un papel importante en la reducción de las concentraciones de mercurio en el agua, pues experimentalmente se ha demostrado que con turbiedades mayores de 100 UNT, la eficiencia crece sustantivamente. Con respecto al mercurio orgánico, el proceso de ablandamiento con cal es moderadamente efectivo y dependiente del pH y llega a 30% con pH 9,4 y alcanza entre 60 y 80% con pH entre 10,7 y 11,4.

En el esquema de la figura 6 se muestra una propuesta de María Hernández (2014) de la universidad Politécnica de Madrid para tratar aguas contaminadas con metales pesados provenientes de la minería. La investigación para la eliminación del mercurio se presenta desde la adición del coagulante, es decir, coagulación, floculación y adsorción con cenizas de madera de eucalipto para eliminar el resto de mercurio que queda después de la floculación.



**Fuente:** Hernández, María T (2014)

**Figura 6.** Esquema de la instalación para tratamientos de aguas contaminadas por minería

## PRECIPITACION QUIMICA

Algunos autores incluyen en este apartado la coagulación-floculación. Sin embargo, el término precipitación se utiliza más para describir procesos como la formación de sales insolubles, o la transformación química de un ión en otro con mayor o menor estado de oxidación que provoque la formación de un compuesto insoluble, Moreno Antonio (2011).

Consiste en la dosificación de determinados productos químicos al agua a tratar, con el fin de llevar a cabo una reacción con un contaminante o grupo de ellos, obteniéndose unos compuestos insolubles que por posterior sedimentación o filtración son eliminados del medio. Los factores que afectan en este proceso son principalmente el pH y la temperatura, Moreno Antonio (2011).

Según Martin (2008) se entiende por precipitación química como la formación, por acción de los reactivos apropiados, de compuestos insolubles con los iones metálicos indeseables contenidos en aguas residuales. El proceso tiene lugar al desolubilizarse el metal y formarse el precipitado.

La precipitación química es la tecnología de pretratamiento más común para eliminación de contaminantes que se utiliza para reducir la concentración de metales en el agua residual a niveles que no causen preocupación. Las operaciones de precipitación y sedimentación química, llevadas a cabo de manera independiente o en combinación con reacciones de oxidación-reducción, se utilizan ampliamente para la eliminación de metales.

La precipitación química se realiza la mayor parte de las veces utilizando hidróxido de sodio, compuestos de sulfato (alumbre o sulfato férrico) o sulfuros (sulfuro de sodio o sulfuro de hierro), en la tabla 3 se recogen sus características.

La adición de estos compuestos a aguas residuales portadoras de metales forma hidróxidos de metal o sulfuros de metal respectivamente, y la solubilidad en el agua de éstos es limitada.

Cal, $\text{Ca(OH)}_2$	Sosa Cáustica, $\text{NaOH}$	Sulfuros, $\text{Na}_2\text{SO}_4$ y $\text{FeSO}_4$
Reactivo más barato	Más cara que la cal	Tratamiento eficaz a bajas concentraciones
Genera grandes volúmenes de lodos	Genera menos volúmenes de lodos básicos	Lodo aplicable a la recuperación de suelos
Los lodos normalmente son aplicables a la recuperación de suelos	Lodo aplicable a la recuperación de suelos	

**Tabla 3:** características de agentes de precipitación habituales

**Fuente:** <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/02/02/83698>

Antes de seleccionar un sistema de precipitación química para la separación de metales se deben considerar varios factores entre los que se distinguen:

- La capacidad demostrada del sistema para atenerse a los límites de descarga
- El gasto de capital necesario
- Los costos operacionales y de mantención
- La flexibilidad para ampliar o mejorar el sistema para cumplir con necesidades futuras, la cantidad de contaminante y la cantidad hidráulica permitida en el presente y las que se propongan para el futuro.
- La frecuencia, volumen y características de las descargas del proceso industrial
- La conservación del agua y las posibilidades de su recuperación
- Los resultados de los estudios de tratabilidad de aguas residuales representativas usando la tecnología de tratamiento que se propone

En el caso de metales pesados encontramos que con esta alternativa es posible eliminar un metal pesado disuelto (como plomo, mercurio, cobre o cadmio, que esté como cloruro, nitrato o sulfato) adicionando hidróxido sódico o cálcico, que produce la precipitación del correspondiente hidróxido de plomo, mercurio, cobre o cadmio.

Una de las alternativas de reactivos para poder eliminar mercurio es por ejemplo: el mercurio se hace reaccionar con  $\text{Na}_2\text{S}$  (soluble), dando origen al  $\text{HgS}$  insoluble. Muchos otros metales formadores de sulfuros (p.ej.,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Zn}$ ) pueden precipitarse de la misma manera.

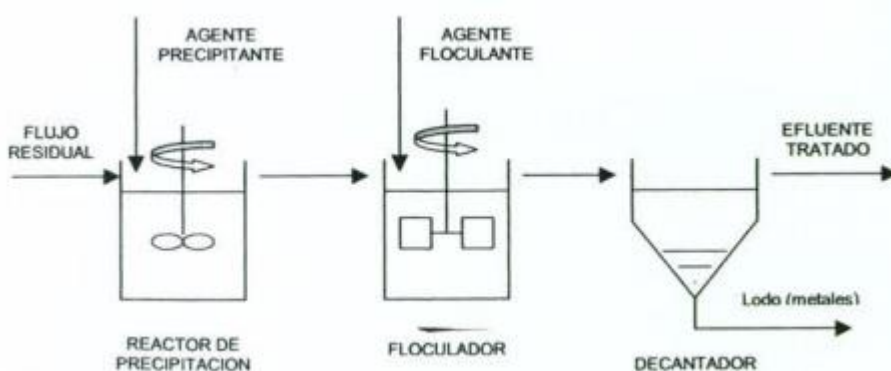
Los metales tienen una propiedad en común, siempre que se encuentren en estado de iones y no de complejos, se precipitan en forma de hidróxidos o incluso de hidrocarbonatos, en una zona de pH característica de cada uno de ellos. De forma general, puede decirse que si el pH del medio en el que tiene lugar la reacción se fija entre 8,5 y 9,5 la solubilidad de estos metales permanece dentro de unos límites tolerables. Pero, según Moreno Antonio (2011) en medio básico con hidróxido cálcico, el mercurio precipita a un pH de 10,5.

Los compuestos orgánicos en las aguas residuales pueden formar complejos de metal y reducir la eficacia de este tipo de tratamiento, en cuyo caso probablemente se necesite realizar estudios a nivel de laboratorio o de proyecto piloto para determinar los métodos de tratamiento apropiados para romper el complejo y hacer que se precipite el metal. Frecuentemente este problema puede resolverse utilizando mejores técnicas de separación de residuos que mediante los tratamientos de residuos.



## Reactor para la precipitación.

El proceso de precipitación química ocurre en un reactor fabricado de material adecuado, que permita el contacto de soluciones químicas en concentraciones muy variadas y en amplio rango de pH. Los materiales frecuentemente utilizados son el acero o los polímeros orgánicos (polipropileno, PVC, polietileno, etc.). El proceso donde puede ocurrir la precipitación química se muestra en la figura 7 presentada a continuación:



**Fuente:** Tratamientos físico-químicos. Procesos de carácter químico. Capítulo 9. Pág. 409

**Figura 7:** Esquema del proceso de filtración

El lodo que se produce en el efluente final, el cual contiene concentraciones muy altas del metal, puede ser tratado posteriormente en un proceso de deshidratación que se puede eliminar mediante incineración controlada o su almacenamiento en depósito de seguridad.

## ADSORCION EN CARBON ACTIVADO PARA ELIMINAR MERCURIO

El carbón activado ha sido una herramienta de descontaminación aceptada mundialmente como la mejor alternativa para eliminar colores, sabores y olores del agua con costos relativamente bajos. Este carbón tratado especialmente tiene la propiedad fundamental de atraer sólidos, líquidos y gases finamente divididos. El grado de eliminación de la contaminación depende fundamentalmente de la concentración inicial, peso, estructura molecular, temperatura y el pH del agua, Nancy Vera B. (2007).

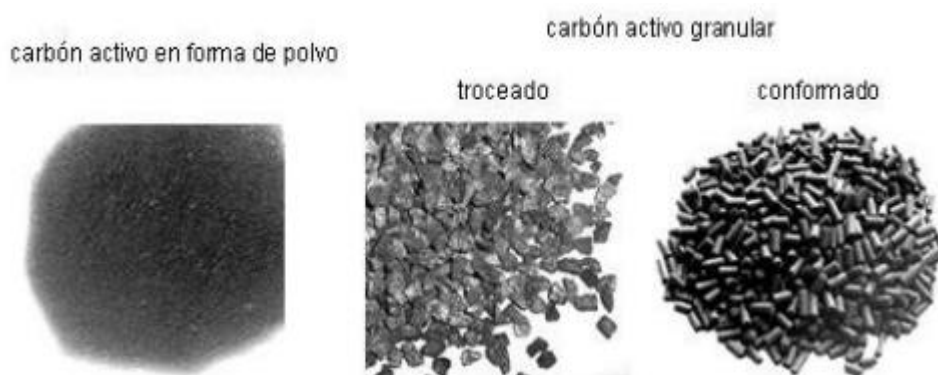
La adsorción es una reacción exotérmica, es un proceso donde un sólido se utiliza para eliminar una sustancia soluble del agua. En este proceso el carbón activado es el sólido. La capacidad de adsorción del carbón consiste en la determinación de su valor de fenol (cantidad de carbón expresada en ppm, necesaria para reducir una concentración fenol estándar de 0,1 ppm a 0,01 ppm de fenol), Nancy Vera B. (2007).

Las variables que tienen mayor incidencia en el proceso de descontaminación son el pH y la temperatura. Encontramos que a mayor temperatura la adsorción se desarrolla más rápido y para pH bajos la adsorción es mayor por la carga positiva del carbón debido a la adsorción del ion hidrogeno, conservándose la carga negativa en coloides y en la mayoría de los grupos de ionización polar en moléculas orgánicas, Quím. Ada Barrenechea Martel (2016).

El carbón activo comercialmente que se utiliza para el tratamiento de aguas viene en dos presentaciones: carbón activado en polvo y carbón granular (figura 8).

El carbón pulverizado se emplea en tratamientos de agua de tipo discontinuo, mientras que el carbón activado granular se emplea en lechos de adsorción. El carbón granular no tiene mucha aplicación en plantas de tratamiento debido a consideraciones económicas.

- **Carbón pulverizado.** especie de polvo finamente dividido, insoluble y de color negro. Puede ser aplicado mediante dos formas: en forma de papilla, que se utiliza cuando en la planta de tratamiento necesitan grandes cantidades de carbón activado; y la segunda forma es en máquinas de alimentación en seco.
- **Carbón granular.** Su tamaño es como el de la arena para filtros, es decir, de 0.1 a 1 mm de diámetros. Es empleado en plantas de tratamientos de agua en lechos de adsorción, especialmente en filtros a presión.



**Figura 8.** Tipos de carbon activado

**Fuente:** <http://www.elaguapotable.com/ALTERNATPOTAB.pdf>

El carbón activado en el proceso de potabilización puede aplicarse al agua tratada ya sea antes o después de la coagulación, pero debe ser antes de la filtración. Se aplica como lechada mediante dosificadores, siempre antes de la filtración y en un punto donde haya un mezclado suficiente. El tiempo de contacto debe ser mínimo 15 minutos antes de la sedimentación o filtración.

Ahora, ¿De dónde se puede obtener el carbón activado?

El carbón activado se puede obtener de diversas fuentes de materias primas, entre las que mencionamos: residuos de base petrolífera, madera, aserrín, antracita (material de origen mineral), cascara de coco, turba, carbón bituminoso, lignito, cenizas negras de fábricas de papel y pizarra.

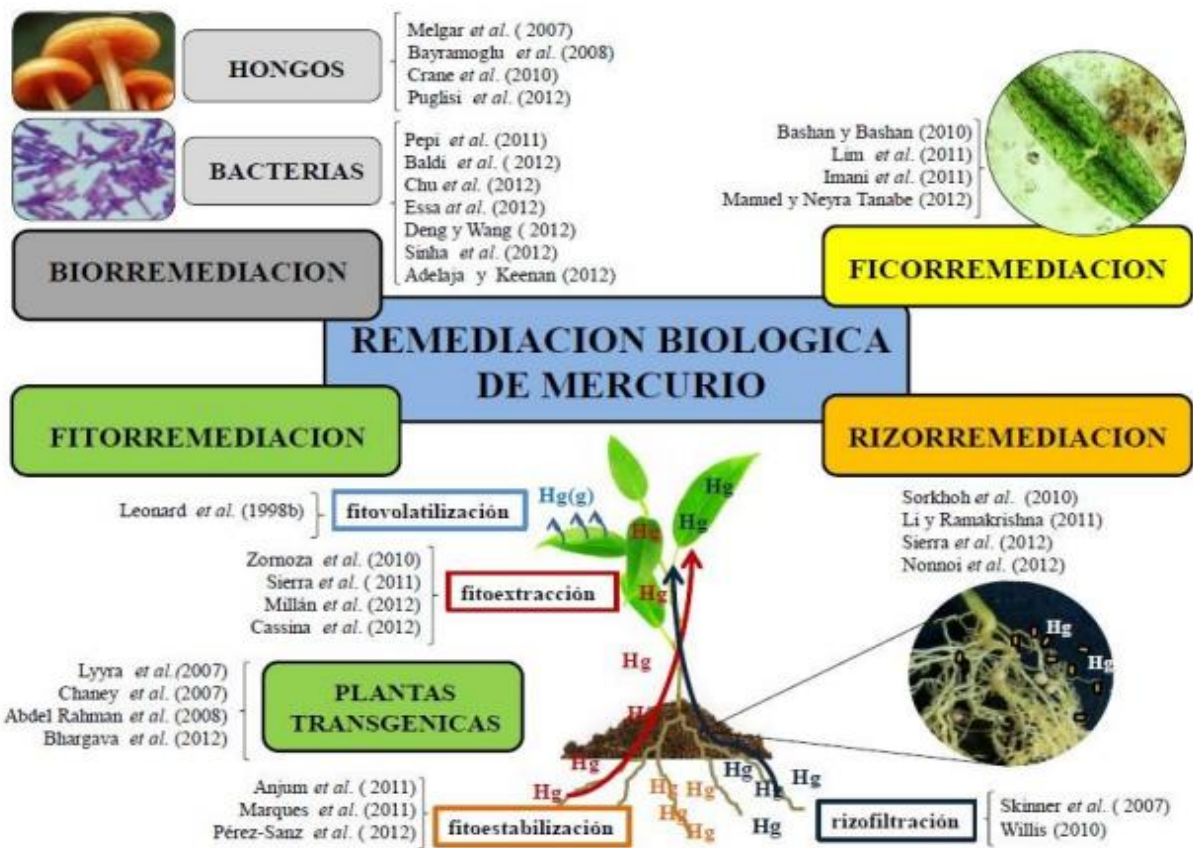
Linares Andrea (2013) realizó la siguiente publicación: Investigadores colombianos de las universidades de los Andes y de la universidad Nacional, preparan un carbón activado para descontaminar aguas.

Moreno P., Juan Carlos, doctor en Química y director del grupo de sólidos porosos y calorimetría aplicada del Departamento de Química de los Andes, afirma que este grupo de investigación “nació con el propósito de crear materiales especiales para purificar las aguas contaminadas con Níquel, Zinc, Mercurio y Cromo, entre otros metales pesados”.

La materia prima para la preparación del carbón de estos investigadores son los residuos agrícolas como cáscaras de café, coco, naranja, yuca o papa, porque tienen entre sus componentes un alto porcentaje de carbono, elemento químico esencial para la elaboración del carbón activado.

Incluso, también apelan al cuesco (pepa) de la palma africana, al bagazo de caña de azúcar y al carbón mineral que no es apto para exportación. El procedimiento para la creación de este material sería: secar las cáscaras, las pepas y el bagazo (en el caso de la caña de azúcar) por medio de calentamiento y los llevan a un tamaño adecuado de partícula (cinco milímetros). Luego, este material particulado se lleva a un horno con una atmósfera inerte (es decir, ausente de oxígeno) y lo mantienen de 4 a 6 horas a temperaturas entre 600 y 700 grados centígrados. El resultado es el denominado carbón activado. Este se preserva en un ambiente que no tenga humedad o se almacena en recipientes que no tengan aire para evitar que se oxide, de manera que mantenga sus propiedades

## REMEDIACIÓN BIOLÓGICA DE MERCURIO



**Fuente:** Paisio, C.E., González P.S., Talano, M.A. y Agostini, E. 2012. Rev Latinoam Biotecnol Amb Algal 3(2):119-146

**Figura 9.** Esquema de las estrategias de remediación biológica de Hg y las más recientes y/o destacadas investigaciones que contribuyen al desarrollo y conocimiento del metabolismo y remoción del metal.

A continuación se presenta un estudio reciente de técnicas de remediación biológica (figura 9) para el mercurio, cuyos autores son Paisio Cintia, González Paola, Talano Melina y Agostini Elizabeth, (2012). Se enfatizara solo en aquellas técnicas que puedan ser usadas para la remoción de Mercurio en aguas contaminadas; por lo tanto, no se tendrá en cuenta la rizorremediacion al tener aplicaciones más específicas en el suelo y al haber deficiente información en cuestión de aguas residuales contaminadas.

## **Biorremediación bacteriana de aguas residuales contaminadas con mercurio**

Wagner-Döbler (2003), resume los resultados obtenidos después de dos años de trabajo en una planta piloto construida para tratar efluentes de una industria de electrólisis de cloro-álcali de la República Checa. En este trabajo se utilizó un biorreactor de lecho empacado con una capacidad para tratar 100 m<sup>3</sup> de efluente por día (conteniendo entre 2 y 10 mg/L de Hg), que operó de manera continua durante 8 meses con excelentes resultados. Este biorreactor se inoculó con un biofilm bacteriano, conformado por siete cepas de *Pseudomonas* inmovilizadas en piedra pómez, que posee la capacidad de reducir Hg(II). La optimización de este sistema implicó el ensayo de diversas condiciones de cultivo, matrices de inmovilización, tipos de biofilms y condiciones de operación del biorreactor.

Por otra parte, Fortunato et al. (2005), evaluaron la capacidad de *Pseudomonas putida* spi3 para remover tiomersal (compuesto organomercurial) de un efluente de una industria de producción de vacunas pudiendo observar que los microorganismos removieron un elevado porcentaje del compuesto. Por su parte, Sinha y Khare (2012) inmovilizaron una cepa de *Enterobacter* con capacidad de acumular Hg, para remediar un efluente industrial recolectado en la India, el cual se suplementó con 7,3 mg/L del metal, obteniéndose 100% de remoción después de 72 h de cultivo. Esta bacteria fue capaz de bioacumular Hg(II), el cual se mantuvo confinado dentro de las células sin observarse volatilización del mismo, lo que aportó la posibilidad de recuperar el mismo después del proceso de biorremediación. Malakahmad et al. (2011) utilizaron un biorreactor para tratar un efluente sintético de la industria petroquímica, que se inoculó con lodos activados conformados por una mezcla de bacterias y algas, obteniéndose una eficiencia de remoción del 93% para una concentración inicial de 9 mg/L de Hg(II), después de 100 días de cultivo. Los autores sugirieron que esta remoción se produjo no sólo por procesos bioquímicos sino también por procesos de bioadsorción a los lodos.

## **Ficorremediación de mercurio**

La biotecnología basada en la aplicación de algas para control de contaminación ha sido usada entre otras cosas para la remoción de compuestos inorgánicos, siendo la eliminación de metales pesados de efluentes industriales y aguas residuales domésticas, uno de los principales focos (Oswald, 1988).

Respecto de los mecanismos implicados en este proceso, varios autores han descrito que dicha remediación podría ser llevada a cabo por procesos físico-químicos de adsorción sobre la pared celular (mecanismos de remoción extracelulares) o bien por mecanismos de transporte y precipitación, en los cuales podrían contribuir algunos compuestos secretados, tales como metabolitos celulares y EPS o bien proteínas acomplejantes de iones (Martins et al., 2006).

Diversos investigadores han estudiado algas con mecanismos de remoción de Hg extracelulares, como Manuel y Neyra Tanabe (2012) observaron que diferentes especies pertenecientes a los géneros *Scenedesmus*, *Chlorella* y *Oscillatoria* fueron capaces de adsorber Hg (entre un 10-40% de 100 mg/L).

Algunos investigadores han estudiado la eliminación de Hg(II) en solución por un sistema de algas inmovilizadas en alginato, tanto en cultivos de *Chlamydomonas reinhardtii* como en *Chlorella emersonii*. En ambas algas inmovilizadas la acumulación de Hg(II) fue mayor que en células libres (Bayramoğlu et al., 2006; y Bashan, 2010). Recientemente, Imani et al. (2011) estudiaron la capacidad de *Dunaliella*, para tolerar y remover Hg(II), demostrando por primera vez que esta alga toleró y adsorbió 67% de 30 mg/L Hg(II) en una hora.

La aplicación de organismos genéticamente modificados en la remediación de contaminantes ha recibido una gran atención debido a que éstos poseen mayor capacidad de remoción de una gama de contaminantes, que incluye compuestos clorados, hidrocarburos aromáticos, metales pesados, y sustancias tóxicas no polares, etc. (Urgun-Demirtas et al., 2006). En particular, existen antecedentes de algas modificadas genéticamente para la remoción de Hg. He et al. (2011) utilizaron el alga verde *Chlamydomonas reinhardtii* 2AMT- 2, transgénica para una metalotioneína, combinada con ultrasonido para recuperar efectivamente Hg(II) a partir de sedimentos contaminados. De modo similar, Huang et al. (2006) utilizaron la microalga *Chlorella* sp. DT, transformada con el gen *merA* de *Bacillus megaterium* MB1, para eliminar Hg(II). Las cepas transgénicas mostraron una mayor capacidad de eliminar el contaminante, mayor tasa de crecimiento y actividad fotosintética y menor expresión de la enzima superóxido dismutasa, que el tipo salvaje.

### **Fitorremediación de mercurio**

La fitorremediación involucra el uso de plantas, naturales o modificadas genéticamente, para remover diversos contaminantes del suelo y/o aguas. Esta estrategia de remediación consiste en cuatro diferentes tecnologías para la remediación de suelos, sedimentos o agua contaminados con metales, cada una con un mecanismo de acción diferente (Vara Prasad y Oliveira Freitas, 2003). Estas incluyen:

- a) Rizofiltración, que implica el uso de plantas para remediar diversos ambientes acuáticos;
- b) Fitoestabilización, donde las plantas se utilizan para estabilizar los contaminantes en el suelo más que para removerlos;
- c) Fitovolatilización, que implica el uso de plantas para extraer ciertos metales del suelo y luego liberarlos en la atmósfera por volatilización;
- d) Fitoextracción, donde las plantas absorben los metales del suelo y los translocan a los tejidos aéreos, donde éstos se acumulan (fitoacumulación)

En la fitorremediación se presentara a continuación estudios encontrados en la tecnología de remediación rizofiltración, por tener una mayor aplicabilidad en las aguas contaminadas con mercurio.

#### **Rizofiltración:**

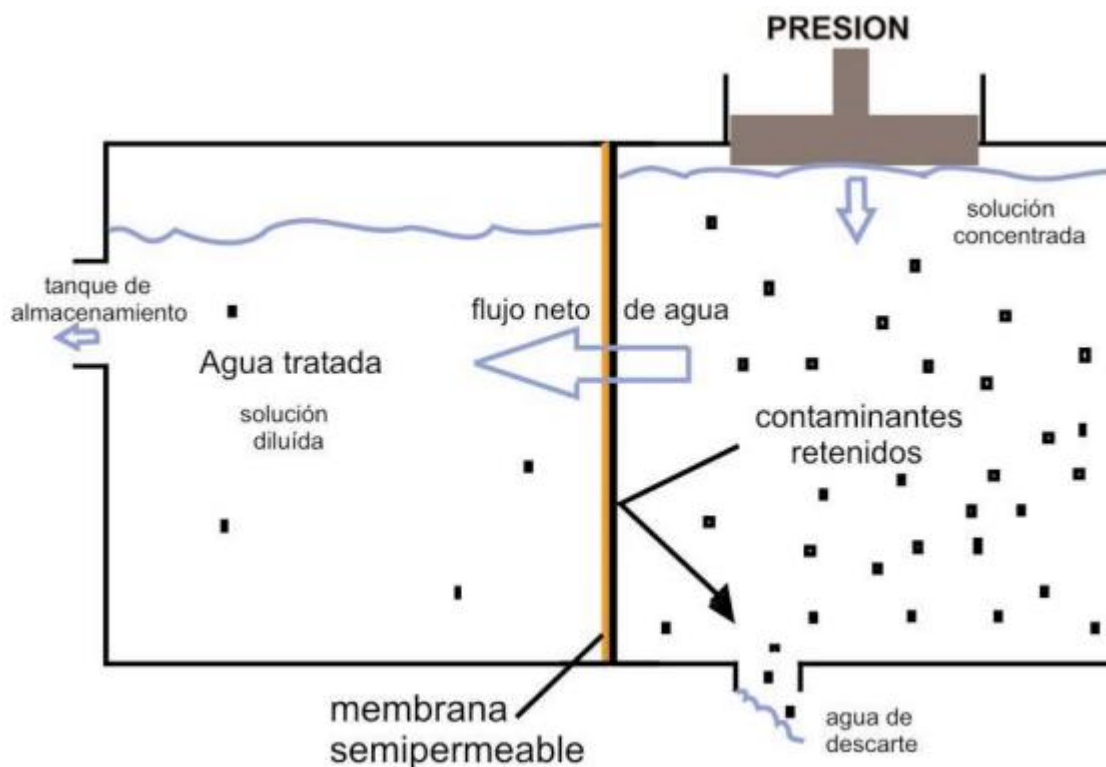
Representa una alternativa prometedora para la eliminación de metales en ambientes acuáticos. El proceso implica el cultivo de plantas en hidroponía y su trasplante a aguas contaminadas con metales, a partir de las cuales las plantas absorben y concentran los metales en sus raíces y brotes. Después de un cierto tiempo las plantas se cosechan y se disponen para su uso final. Las plantas empleadas con estos fines deben ser capaces de acumular y tolerar cantidades significativas del metal, además de ser fácilmente manipulables, poseer un bajo costo de mantenimiento, y una baja necesidad de eliminación de residuos secundarios.

Las especies que parecen ser prometedoras en el sentido de remover mercurio del agua se incluyen: *Azolla* *Carolinia* (Bennicelli et al., 2004), *Myriophyllum spicatum*, *Ludwigia peploides* y *Mentha aquatica* (Kamal et al., 2004), *Eichornia crassipes*, *Pistia stratiotes*, *Scirpus tabernaemontani*, y *Colocasia esculenta* (Skinner et al., 2007). En estos estudios, la reducción en la concentración de Hg fue mayor al 90%.

## OSMOSIS INVERSA

En el proceso de osmosis inversa se aplica una presión, que es superior a la presión atmosférica, a la solución que se encuentra concentrada y de esta forma se impide que ocurra la osmosis, es decir se invierte el proceso. Con la presión que es suministrada se obtiene agua pura, que es el principal objetivo, a través de la membrana desde el lado que tiene las concentraciones altas de contaminantes al lado diluido (figura 10). De esta forma los iones de sales, metales, entre otros son repelidos por la membrana. El agua que es purificada se almacena en un tanque y del lado donde se retuvieron las impurezas son desechadas se descartan en el flujo de agua, evitando así la acumulación de estos como ocurre en los filtros convencionales, Cornell Cooperative Extension (1995).

Consiste en pasar un efluente por membranas semipermeables, para separar y quitar los sólidos disueltos, los orgánicos, los pirogénicos, la materia coloidal, microorganismos, virus y bacterias del agua. La ósmosis inversa es capaz de remover hasta el 99.5 % de la contaminación, Water Solutions (2016).



**Fuente:** Cornell Cooperative Extension, New Cork State College of Human Ecology. Diciembre, 1995.

**Figura 10.** Proceso de osmosis inversa

El tratamiento por osmosis inversa reduce la concentración de sólidos totales disueltos, entre los que se incluyen iones, metales (mercurio) y partículas muy pequeñas que se encuentran en suspensión. En la tabla 4 se presenta una lista de iones, metales, compuestos orgánicos, de pesticidas, partículas y microorganismos que generalmente son removidos por la técnica de osmosis inversa, donde podemos observar el mercurio que es el metal de importancia en esta revisión.

**Tabla 4.** Lista abreviada de compuestos químicos, partículas y microorganismos retenidos por purificadores de agua a base de Osmosis Inversa.

**Fuente:** Cornell Cooperative Extension, New Cork State College of Human Ecology. Diciembre, 1995

<b>Iones y metales</b>	<b>Compuestos orgánicos</b>
Arsénico – Bario – Bicarbonato – Cadmio – Calcio – Carbonato – Cloruro – Cromo – Cobre – Fluoruro – Hierro – Plomo – Magnesio – Manganeso – Mercurio – Nitrato – Potasio – Radio – Selenio – Sodio – Sulfato	Benzeno – Tetracloruro de carbono – Diclorobenzeno – Tolueno – Tricloroetileno
<b>Partículas y microorganismos</b>	<b>Pesticidas</b>
Asbestos – Cysts (protozoos) – bacterias – hongos	1,2,4- triclorobenzeno – 2,4-D – Atrazina – Endrin – Heptachlor – Lindane – Pentaclorofenol

El USEPA ha identificado las Mejores tecnologías disponibles (BAT) capaces de eliminar los contaminantes regulados de su agua potable. Entre las que identificaron para eliminar mercurio, encontramos que la osmosis inversa es una de las mejores tecnologías para remover el mercurio inorgánico.

En la literatura se encuentra un rango que esta entre 94% - 97% de la remoción de mercurio en osmosis inversa, como se muestra en la siguiente tabla 5. Pero, según Villanueva (2007), La ósmosis inversa es capaz de remover hasta el 99.5 % de la contaminación.

**Tabla 5.** Porcentaje retenido de ciertos elementos en la osmosis

**Fuente:** B&P, Water Technologies srl. Tratamientos de aguas. Equipos de osmosis inversa y desalación, (2016)

Elemento	Percentuale	Elemento	Percentuale
Amonio	80-90%	Cadmio	93-97%
Silice	80-90%	Calcio	93-98%
Nitrato	85-95%	Mercurio	94-97%
Bromuro	90-95%	Fosfato	95-98%
Cloruro	92-95%	Piombo	95-98%
Fluoruro	92-95%	Hierro	96-98%
Silicato	92-95%	Níquel	96-98%
Sodio	92-98%	Bacterias	99,9%

## ELECTRODIALISIS

Es una técnica de descontaminación que puede remover componentes iónicos de soluciones acuosas empleando membranas permeables selectivas en un campo eléctrico constante (Guastalli, *et al*; 2004). Esta técnica tiene la capacidad de remover iones contaminantes cargados de hasta 0,0001  $\mu\text{m}$ , mediante hojas o laminas porosas de resinas de intercambio iónico con una baja permeabilidad relativa para el agua (Taylor & Wiesner, 2002).

Fundamentalmente se trata de una técnica separativa, de concentración y descontaminación en la que especies iónicas son transportadas a través de membranas iónicas con permeabilidad selectiva (aniones, cationes) bajo la acción de un campo eléctrico, Sylvia Oyonarte (2016).

Este proceso de separación combina el efecto osmótico y el electrolítico para separar especies iónicas de una solución acuosa. Este método aprovecha la propiedad que tienen los iones en solución de migrar, al aplicarles un potencial eléctrico, los iones positivos se desplazan hacia el electrodo negativo (cátodo) y los iones negativos se desplazan hacia el electrodo positivo (ánodo) y el agua purificada se conduce al recipiente de almacenamiento, (Driss, 2010).

Las membranas son láminas delgadas de materiales plásticos con características aniónicas o catiónicas. Algunas investigaciones indican que la electrodiálisis no es efectiva para tratar efluentes inorgánicos con una concentración de metales mayor a 1000 mg.L<sup>-1</sup>, esto sugiere que la electrodiálisis es más adecuada para una concentración de metales pesados menor a 20 mg.L<sup>-1</sup>, (Fu, F., Wang, Q., 2010).

Los resultados de planta piloto indican que la electrodiálisis es un método práctico y económico, que puede remover hasta el 50% de los compuestos inorgánicos disueltos en efluentes provenientes de tratamientos secundarios, si se eliminan aquellas sustancias de mayor tamaño y/o coloidal.

Entre las aplicaciones que tiene la electrodiálisis encontramos las siguientes:

- Desalinización de aguas salobres y la producción de salmueras.
- Tratamiento de la dureza del agua, el desalado del suero de quesos, recuperación de ácido tánico de los vinos y recuperación de ácido cítrico de los jugos de frutas.
- En aguas industriales se emplea en la recuperación de ácidos de los baños electrolíticos y en la eliminación de metales pesados de las aguas de los procesos galvanoplastia.
- Muy usado en aplicaciones médicas y de laboratorio que necesitan agua ultrapurificada

El tratamiento terciario en la depuración de aguas residuales comprende una serie de procesos a los que deben someterse las aguas que provienen del tratamiento secundario, que es, por lo general, un tratamiento biológico. En el tratamiento terciario se eliminan compuestos orgánicos e inorgánicos disueltos. Los tres procesos considerados más adecuados para eliminar componentes inorgánicos de metales pesados del agua son la electrodiálisis, el intercambio iónico y la osmosis inversa, Remtavares (2009).

## **ULTRAFILTRACIÓN**

Según Ahalya, Ramachandra, & Kanamadi (2003) es una operación de separación que comparte características de una filtración normal y de la ósmosis inversa. Consiste en la remoción de partículas coloidales y dispersas de un líquido que radica en hacer pasar el mismo a través de una membrana aplicando alta presión.



En la ultrafiltración se retienen partículas mayores de 0,001  $\mu\text{m}$  (con una presión de 6 bares). Las membranas pueden estar construidas con distintos materiales, normalmente polímeros orgánicos (más baratos pero menos resistentes que las membranas inorgánicas, como las membranas cerámicas). Por lo general la membrana de ultrafiltración se usa como un pretratamiento para el posterior paso a la osmosis inversa, IHOBE (Sociedad Pública del Gobierno Vasco, 2016)

La Ultrafiltración Facilitada con Polímeros solubles en agua (PSU) consta de una primera etapa reactiva de formación de complejos entre uno o más metales con ligandos poliméricos solubles en agua (quelatos), y una segunda etapa de retención de los complejos macromoleculares formados mediante una tecnología de membrana (en este caso ultrafiltración) en fase homogénea.

En una investigación presentada por Llanos L., Javier (2010) sobre tratamiento de efluentes acuosos con metales pesados del grupo de Ingeniería Electroquímica y Tecnología de Membranas del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Castilla-la Mancha, se presenta una alternativa de ultrafiltración que es apoyada por polímeros. El principal objetivo en este trabajo de investigación es el estudio de las etapas de un proceso de recuperación selectiva de iones metálicos, en el que la concentración de los mismos se lleve a cabo mediante ultrafiltración apoyada con polímeros (Polymer Supported Ultrafiltration, PSU) y la regeneración del polímero utilizado se realice mediante la técnica de electrodeposición.

Dentro de las tecnologías de membrana, la ultrafiltración apoyada con polímeros es una técnica que permite la separación de iones metálicos de efluentes acuosos, al hacerlos reaccionar, de manera selectiva, con polímeros solubles en agua. Los complejos macromoleculares formados pueden ser posteriormente retenidos por una membrana de ultrafiltración, originando una corriente concentrada en el ion metálico (rechazo) y otra prácticamente libre del mismo (permeado). Esta técnica ofrece importantes ventajas respecto a otros procesos de membrana, como la ósmosis inversa, entre los cuales destaca su menor consumo energético y su mayor selectividad.

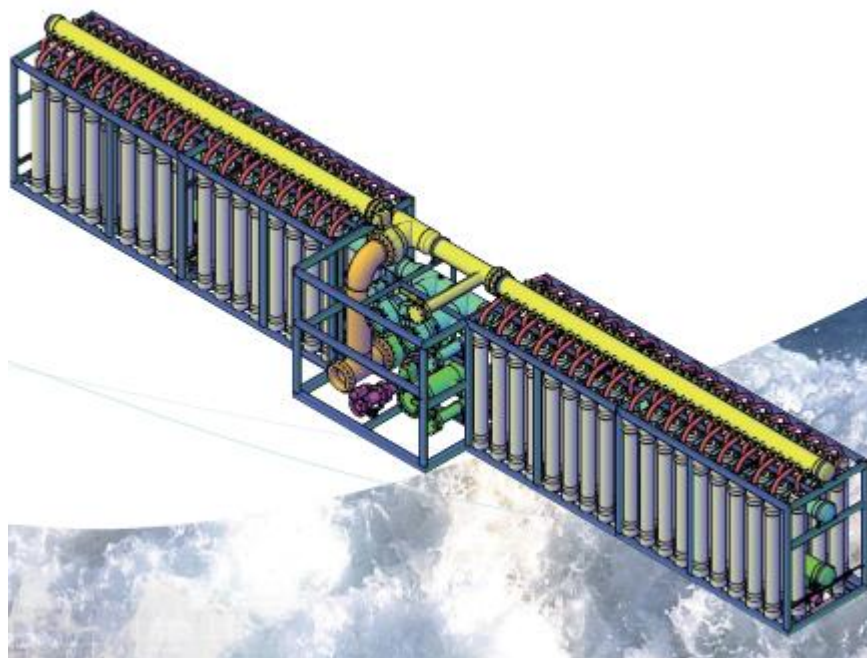
La retención selectiva de iones metálicos mediante un proceso PSU, requiere el desarrollo paralelo de una técnica que permita la reutilización del polímero y la recuperación del ion metálico, una vez que éste es concentrado. Para llevar a cabo este proceso de regeneración, ha sido seleccionada la tecnología electroquímica. La electrodeposición del ion metálico permite recuperar el metal en su forma más valiosa, ofrece la posibilidad de plantear un proceso con un efluente final sin metales pesados y su principal reactivo, el electrón, es un reactivo limpio.

El proceso propuesto consta de dos etapas:

- 1) Retención de los iones metálicos mediante un proceso de ultrafiltración apoyada con polímeros,
- 2) Regeneración del polímero y recuperación del metal mediante un proceso de electrodeposición.

En el proceso se trabajaron con la con la membrana de ultrafiltración Carbosep M5 y se trabajaron con 2 tipos de polímeros. El primer polímero utilizado fue la polietilenimina parcialmente etoxilada (PEIPE), con este polímero obtuvieron buenos resultados pero el proceso de limpieza no es totalmente efectivo, porque después del mismo no se recuperan las características superficiales iniciales de la membrana. Esta pérdida irreversible (aproximadamente el 5 % de su permeabilidad original) sólo se observa tras el primer proceso de lavado de la membrana. Para el caso de iones bimetálicos utilizaron el polímero del ácido de acrílico PAA, con el que igualmente obtuvieron buenos resultados de retención de iones metálicos.

A continuación se muestra una alternativa de prototipo de un equipo de ultrafiltración para implementar en una industria, donde se pueden observar que las membranas de ultrafiltración vienen por módulos (tubos de color gris) como se muestra en la figura 11.



**Fuente:** Fluytec, filtration technologies (2016)

**Figura 11.** Equipo industrial de ultrafiltración

Estos equipos ofrecidos por la empresa Fluytec, filtration technologies tienen una capacidad de producción de hasta 750 m<sup>3</sup>/h, la capacidad del caudal a producir depende el número de módulos que tenga el equipo y permite tratar aguas superficiales, agua de mar, aguas residuales industriales y aguas residuales municipales.

Este sistema, que lo podemos observar en la figura 11, es un tratamiento de agua por ultrafiltración que elimina: bacterias, Arsénico (III y V), Mercurio, Cianuro, Zinc, Cobre, Cadmio, Uranio, Selenio, Antimonio, Trihalometanos, Cloraminas, sedimentos, suciedad, Cloro, Plomo y Cromo (Hexavalente). El purificador no genera residuos ni le agrega nada adicional al agua.

**Calidad del Agua:** el equipo de ultrafiltración implementa una tecnología de vanguardia que evita tener que recurrir a una dosificación de cloro, utilizado para tratar contenido microbiológico, que por una parte es un elemento perjudicial para la salud y al igual provoca trihalometanos en el agua, los cuales son sumamente cancerígenos.

Las membranas de Ultrafiltración tienen una porosidad inferior a las 0,02 micras, lo que evita que pasen bacterias, quistes, algas y cualquier otro elemento de una porosidad superior.

Otra alternativa viable para la purificación del agua que se encuentra en el mercado es el Aok 505 presentado en la figura 12. Este aparato utiliza una membrana de ultrafiltración encimera de fluoruro que elimina el cloro del agua, mercurio, plomo, cloramina, bacterias, Sólidos, Sulfuro de radiación.



**Fuente:** <https://spanish.alibaba.com/product-detail/aok-505-ultra-filtration-countertop-fluoride-water-removes-chlorine-lead-mercury-chloramine-bacteria-solids-sulfide-radiation-60207172641.html>

**Figura 12.** Sistema de filtro de agua de ultrafiltración (Modelo AOK-505)

Consta de 5 cartuchos de filtro, como se muestra en la figura 13. En la **primera etapa** consta de Alúmina activada + KDF + carbono Calgon, donde se elimina un 99% de cloruro, metales pesados y gustos. En la **segunda etapa** es un bloque constituido de carbón activado comprimido, donde se elimina el cloro indeseable, sabores, olores y colores. En la **tercera etapa** se encuentra una membrana de fibra hueca de 0,01 micras, donde se elimina el plomo, virus, productos químicos, pequeñas partículas en suspensión y más. En la **cuarta etapa** se encuentra una estructura de carbón activado, donde se elimina cloruro y productos químicos. Y por último en la **quinta etapa** bolas de energía FIR + mineral recubierto de plata de carbón activado consiste como en un pulido final para un gran sabor.



**Fuente:** <https://spanish.alibaba.com/product-detail/aok-505-ultra-filtration-countertop-fluoride-water-removes-chlorine-lead-mercury-chloramine-bacteria-solids-sulfide-radiation-60207172641.html>

**Figura 13.** Composición de los cartuchos de ultrafiltración

## FILTRO CON MAGNETITA

El día 28 de febrero de 2007, se dio a conocer por parte de unos investigadores científicos de Argentina de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CONEA) el diseño de un nuevo y particular sistema para eliminar los metales del agua de consumo y de los efluentes industriales. El sistema se basa en un filtro de óxido de hierro que actúa en forma química. Los creadores del sistema de filtración en mención comunicaron que tendrá versiones domiciliarias y de uso industrial.

El biólogo Carlos Cañellas, quien es el científico que encabeza el grupo de investigadores, afirma que los óxidos de hierro retienen los metales pesados como el mercurio, cromo y el arsénico.

Cañellas: "Empezamos a experimentar con la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), un óxido de hierro que abunda en la zona de las Cataratas del Iguazú y en el sur de Brasil. Es característica por su color negro muy brillante."

Antes de continuar, es preciso presentar algunas de las características de la magnetita:

**Magnetita:** Posee en su estado natural características magnéticas; es un mineral de hierro constituido por óxido ferroso-diférrico ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) que debe su nombre de la ciudad griega conocida con el nombre de Magnesia. Es un mineral muy denso, frágil, duro y con propiedades ferromagnéticas, es capaz de atraer al hierro y al acero junto con otros metales. Su color es pardo negruzco, con brillo metálico.

Continuando con la investigación, los científicos involucrados en todo el proceso observaron después de realizada la prueba con magnetita los resultados que precisamente deseaban obtener: "sobre la superficie de esa piedra, tanto el uranio como los metales pesados quedaban adheridos, no por un efecto magnético, sino por uno químico".

No obstante, se encontraron con la limitación de que en la naturaleza, la magnetita nunca es pura, sino que viene con otros elementos en proporciones siempre azarosas. Por esta razón Carlos Cañellas señaló: "De ahí que nos propusiéramos sintetizarla", y explica que el desarrollo consistió entonces en conseguir por coprecipitación química un óxido de hierro igual a la magnetita, con un 99,9 por ciento de pureza que permite colocar menos masa en el filtro y asegurar una calidad uniforme de los productos finales.

La presentación de la unidad de filtro de sistema domiciliario es:

- Tiene 8 centímetros de altura y 6 de diámetro.
- Puede ser conectada a cualquier tipo de canilla.
- En su interior, se encuentran hermética e inviolablemente confinados 80 gramos de magnetita, 20 de carbón activado con plata y 20 de cuarzo microcristalino que retiene los metales pesados.
- Antepuesta a ella, va colocado un prefiltro, renovable, compuesto por cuarzo microcristalino que tiene la función de retener los sólidos en suspensión, lo que aumenta la eficiencia del filtro de magnetita. Ambos están confeccionados con plástico ABS.

- El sistema trabaja por adsorción química. En función del grado de contaminación metálica que posea el agua de entrada, el prefiltro tiene una durabilidad aproximada de 12 meses. Permite tratar 300.000 litros y su precio oscilará entre los 400 y 500 pesos. Deberán ser cambiados por la firma proveedora, quien se ocupa de la gestión y la disposición final de los residuos.

El diseño ya está patentado, registrado en Salud Pública y certificado por el Instituto Nacional de Tecnología Industrial para la fabricación de unidades filtrantes para el agua de consumo, la que se utiliza para tomar y cocinar

## **FILTRO CON NANOPARTÍCULAS DE ORO**

Recientemente se han hecho varios aportes a nivel de investigación sobre alternativas para la eliminación de metales pesados presentes en el agua, uno de ellos y que es muy destacable es por parte del Instituto Tecnológico metalmeccánico AIMME, a través de su Unidad de Tecnologías Químicas, que ha desarrollado un prototipo de filtro, con posibilidad de incorporar nanopartículas de oro, que permite la reducción de la contaminación del agua por metales pesados. Esta tecnología está pensada básicamente para las industrias del sector del metal cuyas aguas necesitan tratamientos especiales para su depuración.

Francisco Bosch, que es el responsable de la unidad de tecnologías químicas, expresa: "gracias a este filtro se reduce la concentración de metales pesados y se mejora la eficiencia en su tratamiento, reduciendo de esta manera el impacto generado al medio ambiente". Hoy por hoy podemos apreciar que en el sector industrial muchas empresas utilizan técnicas físico-químicas como la precipitación, mientras que este innovador método de depuración "consigue mejorar la captación de los metales, especialmente cuando se encuentran en concentraciones bajas" minimizando el impacto metalmeccánico sobre el medio ambiente.

La técnica que utiliza nanopartículas de oro permite también la recuperación de componentes que pueden reutilizarse después del filtrado, innovación muy útil para las industrias que fabrican maquinaria para otras industrias, cuyas aguas necesitan tratamientos especiales de depuración.

Las nanopartículas de oro son partículas microscópicas de tamaño menor a 10 nanómetros, es decir, a 10 mil millonésimas partes de un metro, que constituyen un área de intensa investigación científica. Tienen una amplia variedad de aplicaciones potenciales en los campos de biomédicos, ópticos, y electrónicos, como las de masculino, detector y catalizador en la fabricación de formaldehído sin producir residuos. Este proyecto se enmarca en el grupo de actividades de la Unidad de Tecnologías Químicas donde se desarrollan nuevos materiales y procesos, principalmente con el uso de nanopartículas que, aplicadas a metales, modifican su comportamiento.

## **FILTRO CON ALGAS**

El equipo de investigadores del Departamento de Ingeniería Matemática y del Centro Gibmar, del Centro de Biotecnologías UdeC de Chile ha desarrollado un filtro de algas. En este proyecto, se ha llevado a cabo la modelación, diseño y desarrollo de un sistema automatizado de biofiltración alternativo, utilizando algas inmovilizadas en una matriz polimérica para la separación de metales pesados, desde aguas cargadas tanto de forma natural como mediante actividades industriales

Para desarrollar esta iniciativa se han unido el Departamento de Ingeniería Matemática, con el Dr. Roberto Riquelme, junto al Grupo Interdisciplinario en Biotecnología Marina (Gibmar) del Dr. Cristian Agurto, quienes intentan dar solución a uno de los principales problemas ambientales de la actualidad: el alto contenido de metales pesados presente en el agua y que constituyen un riesgo potencial para la salud humana.

El Dr. Roberto Riquelme, director del proyecto, explicó que el objetivo principal es realizar la modelación, diseño y desarrollo de un sistema automatizado de biofiltración alternativo, con un costo competitivo, utilizando algas inmovilizadas en una matriz polimérica para la remoción de metales pesados, desde aguas cargadas tanto de forma natural como desde actividades industriales. “Entre otros aspectos, la idea es también dar cumplimiento a las normativas sanitaria y ambiental (DS90 y DS609) vigentes en Chile, que está dirigida a mejorar la calidad del agua, ya sea para consumo humano como también para biorremediar efluentes líquidos industriales que puedan ser reutilizados”.

Para el director alterno del proyecto, el Dr. Cristian Agurto, la iniciativa también suma innovación a la propuesta, que tiene que ver con la selección de algas para la remoción de metales pesados mediante filtros 100% naturales y biodegradables, “demostrando así una tecnología escalable y comercialmente viable, además de promover la entrada de este producto a un mercado en crecimiento con amplias oportunidades de desarrollo económico en nuestro país”.

## COSTOS

### RESINAS DE INTERCAMBIO IONICO

Existen diferentes tipos de resinas, en diferentes colores, tamaños, formas y precios. Las zeolitas sintéticas 4A (figura 15) proveniente de la empresa Meishan Jiayuan Chemical Co., Ltd., de China, tienen un costo alrededor de **\$ 1.103.056,5** por cada tonelada.



**Fuente:** Meishan Jiayuan Chemical Co., Ltd., China (2016)

**Figura 15.** Zeolita sintetica 4A

En las opciones de zeolitas naturales, tenemos que la Zeolita Cubana Clinoptilolite (figura 16) es la mejor en asuntos de remover mercurio del agua. En el mercado tiene un costo de **\$ 382165, 6** por cada tonelada.



**Fuente:** Gongyi City Meiqi Industry & Trade Co., Ltd. China (Mainland) | Trading Company, (2016)

**Figura 16.** Zeolita natural Clinoptilolite

### COAGULANTES

#### - Sulfato férrico

El sulfato férrico ofrecido por la empresa Sulfoquimica S.A. de Itagüí (Antioquia) tiene un precio de **\$ 23.637** en una presentación de 25 kilos (figura 17).



**Fuente:** Sulfoquímica S.A., 2016. Itagüí (Antioquia)

**Figura 17.** Sultafo férrico

#### - Sulfato de aluminio

El sulfato de aluminio lo encontramos en una presentación de 25 kilos (figura 18) por un total de **\$37.700** incluyendo el IVA, donde cada kilo tiene un costo de **\$1.550**.



**Fuente:** Distribuidora Aliados Ltda. Productos químicos – materias primas. Bogotá (Colombia), 2016.

**Figura 18.** Sulfato de Aluminio

### CARBON ACTIVADO

El carbón activado granular viene en diferentes presentaciones, dependiendo de la cantidad deseada. El carbón activado es insoluble en agua y de color negro, como se muestra en la figura 19. La Leñería es una empresa colombiana ubicada en Bogotá, el precio ofrecido por el carbón activado es de **\$ 140.000** el bulto, que contiene 25 Kg.





**Fuente:** La Leñeria, venta de leña, carbón y bioetanol; Bogotá (2016)

**Figura 19.** Carbon Activado

## OSMOSIS INVERSA

Las diferentes marcas y equipos disponibles en el mercado para osmosis inversa cuentan con una variedad de costos que depende de la cantidad de litros que se va a tratar por unidad de tiempo.

El siguiente equipo (figura 20), cuenta con una capacidad de tratar un caudal de 200 L/h, compuesto de prefiltro de 5 micras, presostato de mínima, electroválvulas de aporte y arrastre, caudalimetro de permeado y recirculación, bomba vertical multietapa de alta presión, una membrana del tipo TFC de 40 x 40, regulador de rechazo, manómetros de glicerina, válvula de regulación del tipo punzón, centralita electrónica con conductivimetro y múltiples programaciones. Conversión del 30% al 50%. Caudal máximo 200 l/hora con TDS de aporte de 2000 p.p.m., potencia 1.5 cv



**\$ 18.817.058**

**Fuente:** Aquality Tratamiento Integral del Agua, S.S.L. España. (2015)

**Figura 20.** Equipo de osmosis inversa industrial.

AGUATEC agua y tecnología, ubicada en Medellín - Colombia, ofrece el siguiente equipo (Figura 21.) con las siguientes características para un caudal de 15.141,6 L/día lo que equivale a 630,9 L/h:

- Filtros de Sedimentos.
- Manómetros.
- Filtro de Carbón Activado.

- Regulador de Presión.
- Presóstato.
- Bomba centrífuga multietapa en acero inox.
- Membrana y Portamembrana
- Medidores de Conductividad de Permeado.
- Flujómetros de Permeado y Rechazo.
- Estructura en Acero Inox.
- Nuestros equipos cuentan con un Flush Automático que permite el lavado programado del equipo cada 24 horas



**\$ 25.000.000**

**Fuente:** AGUATEC S.A.S, agua y tecnología, Medellín (2016).  
**Figura 21.** Equipo osmosis inversa

## ULTRAFILTRACION

La inversión en un equipo de ultrafiltración para una planta de tratamiento significa una gran suma de dinero, al ser equipos muy costosos pero al igual, también son muy eficientes. En la figura 24 podemos observar un equipo con membranas de ultrafiltración con un costo de **\$ 315.159.000** por la empresa Zhangjiagang Fillex Packaging Machinery Co., Ltd.

El equipo con membranas de ultrafiltración tiene la capacidad de tratar un caudal que va de 1000 L/h a 100000 L/h



**Fuente:** Zhangjiagang Fillex Packaging Machinery Co., Ltd. China (2016)  
**Figura 22.** Equipo con membranas de ultrafiltracion

## ELECTRODIALISIS

Al igual que lo equipos de ultrafiltración, los equipos de electrodiálisis son muy costosos. En la figura 25 se muestra un equipo con membranas de electrodiálisis con un precio de **\$ 157.579.500** de la empresa Zhangjiagang City New Crown Machinery Co., Ltd. China. El equipo cuenta con una capacidad de 10000 L/h



**Fuente:** Zhangjiagang City New Crown Machinery Co., Ltd. China (2016)  
**Figura 23.** Equipo de electrodiálisis

## Membrana para tecnologías de filtración

Las membranas utilizadas para la electrodiálisis tienen un precio que oscila alrededor de **\$ 3.151.190** cada unidad como la mostrada en la figura 23. Esta membrana es ofertada por la empresa Xi'an Xinshengtai Water Treatment Technology Co., Ltd. China.



**Fuente:** Xi'an Xinshengtai Water Treatment Technology Co., Ltd. China (2016)  
**Figura 24.** Membrana para filtración

En la siguiente tabla 6 se realiza una compilación de las técnicas más representativas y más aplicadas a aguas contaminadas con mercurio, donde se muestran sus principales ventajas, desventajas, el impacto que ocasionan al medio ambiente y posible solución a implantar para los efluentes que se generan al final de cada proceso.

**Tabla 6.** Ventajas, desventajas y soluciones a las alternativas de remoción de mercurio

ALTERNATIVAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS	IMPACTO	SOLUCION
<b>ADSORCION</b> (intercambio iónico, biomasa residual)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bajos costos</li> <li>- Buenas eficiencias en aplicación a aguas contaminadas con Hg</li> <li>- Puede reutilizar los desechos de residuos agrícolas, mediante la regeneración con ácidos o bases</li> <li>- Excelente calidad del agua tratada al final del proceso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poca aplicabilidad en planta potabilizadoras</li> <li>- Bajas eficiencias, en comparación con las demás alternativas</li> <li>- Pérdida de tiempo en la regeneración del material adsorbente y en la adsorción del contaminante</li> <li>- Utiliza ácido sulfúrico como regenerante</li> </ul>	Impacto al medio ambiente mediante las concentraciones de metal en el efluente al final del proceso, al igual que del uso de ácido sulfúrico para la regeneración del material.	Los impactos se pueden disminuir mediante procesos de oxidación avanzada PAO's
<b>PRECIPITACION QUIMICA</b> (coagulación, floculación, sedimentación)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gran aplicabilidad en plantas de potabilización</li> <li>- Eficiencias de hasta el 97%</li> <li>- Bajos costos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gran producción de lodos contaminantes, lo que termina vertiendo grandes concentraciones del metal al ambiente</li> <li>-Producción de efluentes alcalinos y ácidos</li> </ul>	Contaminación del ambiente por el desechos de lodos	Deshidratación de lodos y posterior adecuado almacenamiento o uso de este para mejorar la calidad del suelo
<b>MEMBRANAS</b> (osmosis inversa, ultrafiltración, electrodiálisis)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eficiencias superiores del 97%</li> <li>- Remoción de compuestos orgánicos</li> <li>- Gran selectividad de metales</li> <li>- Procesos sencillo y automático</li> <li>- Los equipos ocupan poco espacio</li> <li>- Fácil mantenimiento</li> <li>- Producción continua</li> <li>- Excelente calidad del agua tratada</li> <li>- No trabajan con productos químicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Altos costos de los equipos y de implementación</li> <li>- Requieren alto consumo de energía</li> <li>- Poca aplicabilidad en plantas de potabilización</li> <li>- Reducción en el pH del agua</li> <li>- Generación de alta concentraciones del metal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Consumo de grandes cantidades de energía eléctrica</li> <li>- Contaminación al ambiente por el material retenido por la membranas</li> </ul>	En caso de utilizar polímeros para mejorar la eficiencia de la técnica, se recomienda la técnica de electrodeposición para regenerar los polímeros y recuperar el Hg en su forma más valiosa

## CONCLUSIONES

Al finalizar la búsqueda y recopilación de información relacionada con las técnicas de potabilización que se utilizan para remover mercurio, se concluyen los siguientes aspectos:

- El mercurio es un metal tóxico y perjudicial para los seres vivos. Las principales fuentes de contaminación antropogénica en Colombia de mercurio son la extracción de oro a pequeña escala, donde el mayor impacto se evidencia en los peces y el consumo de estos por seres humanos, causando estragos en la salud.
- Uno de los factores que limita el uso de ciertas técnicas, como las de membrana y adsorción, es el factor económico.
- La eficiencia en la remoción de metales pesados en las diferentes técnicas depende fundamentalmente de variables como: la temperatura, el pH y la concentración del metal en el agua.
- Las técnicas de filtración por membrana como la ultrafiltración, ósmosis inversa y electrodiálisis son muy eficientes para la remoción de metales pesados y se ha convertido en una parte importante en la tecnología de la separación en los últimos años. Hay dos factores que determinan la efectividad en los procesos de filtración de membrana que son la selectividad y productividad. Las principales ventajas de estas técnicas de membrana es el hecho de que trabajan sin la adición de productos químicos, con un uso relativamente bajo de energía y son procesos fáciles. El máximo representante de estas técnicas de membrana es la ósmosis inversa, pero con respecto al factor económico, presenta elevados gastos de bombeo y poca selectividad en la separación de ciertos iones metálicos en comparación con la ultrafiltración y la electrodiálisis.
- Otra alternativa representativa y eficiente a la hora de remover el mercurio del agua es la precipitación química. El problema concerniente a esta técnica, comparándola con las tecnologías de membrana, es la gestión de lodos generados al tener una alta concentración de mercurio. Las variables que afectan este proceso principalmente son: el pH y la temperatura.
- Por otro lado la adsorción es un proceso que depende, en el caso del mercurio, de las condiciones experimentales como el pH, la concentración de mercurio y adsorbente, la competencia que se presente entre iones y del tamaño de la partícula. Y por último, para conocer la posibilidad que un material tiene para ser utilizado como adsorbente, es necesario conocer cuáles son las condiciones óptimas para conseguir la máxima recuperación de metal, por lo tanto es preciso determinar los principales parámetros que afectan al sistema adsorbato adsorbente.

De igual forma, los bioadsorbentes son otra alternativa eficaz para la remoción de mercurio al ser económica y eficiente que tiene posibilidades para la aplicación industrial. En la recopilación de información se encontró que el mejor bioadsorbente para la remoción de mercurio es la cascara de arroz modificada con ácido sulfúrico.

## RECOMENDACIONES.

Al finalizar la revisión bibliográfica de las diferentes alternativas posibles para remover el mercurio del agua es posible tener un panorama amplio de cuál de estas opciones es la más indicada a implementar en posibles casos de contaminación con mercurio.

Por ejemplo, las más eficientes de todas las técnicas son las que utilizan membranas entre las que se mencionan: electrodiálisis, ultrafiltración y osmosis inversa, siendo esta última la más representativa y la más eficiente para remover el mercurio, pero no es recomendable el uso de esta alternativa en plantas de potabilización debido a que sus equipos, implementación y mantenimientos tienen costos muy elevados, lo que al final no resulta viable.

Por otro lado como recomendación personal, la técnica más “popular” en cuestiones de remover metales pesados es la precipitación química, esta alternativa nos permite remover altas concentraciones de mercurio y sus costos no son muy elevados, en comparación con las técnicas de membrana, y me permite cumplir con los límites permisibles impuestos en la legislación. El problema relacionado con el uso de esta técnica se presenta en la gran producción de lodos que son desechados al medio ambiente, causando impactos negativos. En este caso lo recomendable es realizar un debido tratamiento a los lodos, como podría ser la deshidratación y el posterior adecuado almacenamiento de estos o al igual, también se podría usar para mejorar la calidad de los suelos.

## BIBLIOGRAFIAS

- CARDENAS H., Santiago. El mercurio, un monstruo dormido en Antioquia. Publicado el 24 de noviembre del 2014.
- SINC, Servicio de Información y Noticias Científicas. La contaminación por mercurio en el agua se puede detectar con un móvil (Febrero 2013)
- MINAMBIENTE. Cuantificación de liberaciones antropogénicas de mercurio en Colombia, 2010. Disponible en: [http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/mercurio/Inventario\\_Cuantificacion\\_Mercurio.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/mercurio/Inventario_Cuantificacion_Mercurio.pdf).
- DARDEL. Aplicaciones de intercambio iónico, guía general. Actualizado de septiembre de 2010. disponible en: [http://dardel.info/IX/applications\\_ES.html](http://dardel.info/IX/applications_ES.html)
- SIMON, Ernesto. Los metales pesados en las aguas residuales. Publicado por Remtavares el 2 febrero, 2008. Disponible en: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/02/02/83698>
- ARRIAGADA, Renán; GARCÍA, Rafael y CID, Ruby. Retención de cromo y mercurio con zeolitas naturales y sintéticas, 2016. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad de Concepción. Chile. Disponible en: <http://www.zeocat.es/docs/aguacrhg.pdf>
- ASMUNDIS, Cecilia; ROMERO H., César; ACEVEDO A., Hugo, PELLERANO G., Roberto y Vázquez A., Francisco. funcionalización de una resina de intercambio ionico para la preconcentracion de hg(ii), 2011.
- SCIELO, Chile. CURI, Adilson; GRANADA V., Wilmer; LIMA, Hernani y SOUSA, Wilson, (2006). Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros. Disponible en: [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642006000600017](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000600017)
- GEDAR, Gestion de aguas y residuos. Aplicaciones de las resinas de intercambio ionico en las industrias, 2016. Disponible en: <https://www.gedar.com/PDF/Industrial/GEDAR-Resinas%20.pdf>
- BLANCO G., Julián; RODRIGUEZ M., Sixto; ESTRADA G., Claudio; BALANDA R., Erick; GELOVER, Silvia y LEAL, Teresa Leal. purificación de aguas por fotocátalisis heterogénea: estado del arte, 2016. Disponible en: <http://www.cnea.gov.ar/sites/default/files/08cap03.pdf>
- CAMPAGNON, Emilia. Fotocátalisis heterogénea para el tratamiento de agua contaminada, 2016. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos90/fotocatalisis-heterogenea-agua-contaminada/fotocatalisis-heterogenea-agua-contaminada.shtml>

- REMTAVAREZ. Tratamiento de aguas contaminadas con mercurio mediante Fotocatálisis Heterogénea. publicado el 27 de abril del 2012. Disponible en: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2012/04/27/131762>
- REMTAVAREZ. Eliminación de metales pesados de aguas contaminadas mediante adsorción selectiva con materiales mesoestructurados híbridos. Publicado el 8 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2013/02/08/131844>
- SANZ P., Eloy; ARENCIBIA, Amaya; SANZ, Raúl; CALLEJA, Guillermo. Adsorción de CO<sub>2</sub> sobre materiales mesoestructurados funcionalizados con grupos amino. Publicado el 3 Febrero 2012 Revista del Grupo Especializado de Adsorción de la RSEQ. Disponible en: [http://digital.csic.es/bitstream/10261/73725/1/Sanz-Perez\\_Adsorci%C3%B3n.pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/73725/1/Sanz-Perez_Adsorci%C3%B3n.pdf).
- PLAZAS, Gustavo. Agua contaminada con metales pesados. Publicado el 17 de marzo del 2014. Disponible en: <http://aguaconmetalespesados.blogspot.com.co/>
- PEREZ H., Francisco. Materiales mesoporosos funcionalizados con grupos amino altamente selectivos para la captura de CO<sub>2</sub>, 2016. Disponible en: [https://eciencia.urjc.es/bitstream/handle/10115/5578/0809\\_P%C3%A9rez,Herrero\\_Francisco.pdf?sequence=1](https://eciencia.urjc.es/bitstream/handle/10115/5578/0809_P%C3%A9rez,Herrero_Francisco.pdf?sequence=1)
- TEJADA, C., VILLABONA, Á., & RUIZ, V. (2012). Biomasa residual para remoción de mercurio y cadmio: una revisión. *Ingenium*, 6(14), 11-21. Disponible en: <http://revistas.usc.edu.co/index.php/Ingenium/article/viewFile/189/174>.
- SALA, Luis; GARCIA, Silvia; GONZALEZ, Juan; FRASCAROLI, María; BELLU, Sebastián; MANGIAMELI, Florencia; BLANES, Patricia; MOGETTA, María; ANDREU, Verónica; ATRIA, Ana; SALAS P., Juan. Biosorción para la eliminación de metales pesados en aguas de desecho, 2010. Real sociedad española de química.
- GREEN ÁREA. Retire el mercurio del agua... un descubrimiento con alta importancia sanitaria y ambiental. Publicado el 20 de octubre de 2010. Disponible en: <http://greenarea.me/es/94479/retire-el-mercurio-del-agua-un-descubrimiento-con-alta-importancia-sanitaria-y-ambiental/>
- HUALDE, Martha. El cilantro purifica el agua Publicado el 13 septiembre 2013. Disponible en: <http://actualidadgastronomica.es/el-cilantro-purifica-el-agua/>
- HERNANDEZ A., María; SANZ R., Laura; MANCEBO P., José. Tratamientos de bajo coste para aguas contaminadas por actividades de minería, 2014.



- MARTEL B., Ada. Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua, 2016. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manuall/tomol/uno.pdf>
- El agua potable. La coagulación – floculación en el proceso de tratamiento, 2016. Disponible en: <http://www.elaguapotable.com/coagulacion-floculacion.htm>
- MORENO, Antonio. Capítulo 8: procesos químicos. Precipitación, coagulación y floculación. Publicado el 10 de Junio de 2011. Disponible en: <http://www.mailxmail.com/curso-agua-tratamientos-1-2/procesos-quimicos-precipitacion-coagulacion-floculacion>
- FRANCISCA M., Franco y CARRO P., Magalí. Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación – floculación; 2014. SCIELO. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S018849992014000200005](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018849992014000200005)
- UCLM. Coagulación – floculación, 2016. Disponible en: [http://www3.uclm.es/profesorado/giq/contenido/dis\\_procesos/tema5.pdf](http://www3.uclm.es/profesorado/giq/contenido/dis_procesos/tema5.pdf)
- BRITO V., Nancy. Alternativas de potabilización para el agua que abastecerá a la ampliación del aeropuerto internacional de la ciudad de México, 2007. Disponible en : <http://www.elaguapotable.com/ALTERNATPOTAB.pdf>
- RUEDA, Arturo; CERVANTES, Leticia; PINEDA, Angel; JOAB, Antonio. Precipitación química, prevención y control de la contaminación del agua. Diciembre, 2013. Disponible en: [http://es.slideshare.net/pineda\\_22/precipitacion-quimica-ambiental](http://es.slideshare.net/pineda_22/precipitacion-quimica-ambiental)
- CIDTA. Precipitación química, Degremont; 2016. Disponible en: <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/quimica.pdf>
- TRIPOD. Contaminación de las aguas por nitrato, tratamiento de aguas residuales, 2016. Disponible en: [http://members.tripod.com/london\\_job/trabajoseninglaterra/id29.html](http://members.tripod.com/london_job/trabajoseninglaterra/id29.html)
- UCLM. Restauración y remediación II: Aguas, 2016. Disponible en: <http://www.uclm.es/users/higueras/MAM/MAM9.htm>
- Junta de Andalucía. Tratamientos físico – químicos. Procesos de carácter químico, 2016. Disponible en: [http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/consolidado/publicacionesdigitales/40542\\_TECNICAS\\_DE\\_PREVENCION\\_DE\\_LA\\_GENERACION\\_DE\\_SUELOS\\_CONTAMINADOS\\_TOMO\\_I/40-542/9\\_TRATAMIENTOS\\_FISICOS-QUIMICOS.PDF](http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/consolidado/publicacionesdigitales/40542_TECNICAS_DE_PREVENCION_DE_LA_GENERACION_DE_SUELOS_CONTAMINADOS_TOMO_I/40-542/9_TRATAMIENTOS_FISICOS-QUIMICOS.PDF)

- PAISIO, C.E., GONZÁLEZ P.S., TALANO, M.A. y AGOSTINI, E. 2012. Rev Latinoam Biotecnol Amb Algal. Disponible en: <http://www.ambientalex.info/revistas/vol3n23.pdf>
- OSMISIS. Tratamiento del agua por osmosis inversa, 2016. Disponible en: <http://www.osmosisinversafiltroagua.com/tratamiento-del-agua/>
- Cornell Cooperative Extension, New Cork State College of Human Ecology. Diciembre, 1995.
- B&P, water technologies srl. Equipos de osmosis inversa y desalación, 2016. Disponible en: [http://www.bpwatertech.com/es/tratamiento\\_de\\_agua/equipos\\_de\\_osmosis\\_inversa\\_y\\_de\\_desalacion.html](http://www.bpwatertech.com/es/tratamiento_de_agua/equipos_de_osmosis_inversa_y_de_desalacion.html)
- QUIÑONES, Edgar; TEJADA, Candelaria; RUIZ, Víctor. Remediación de aguas contaminadas con cromo utilizando diferentes biomateriales residuales. noviembre, 2014.
- REVISTAS CIENTÍFICAS UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA. Ingeniería y región (2016). Disponible en: <http://journalusco.edu.co/index.php/IngenieriaRegion/article/view/775/1580>
- CÁRDENAS S., Ana C. Evaluación del desempeño de humedales construidos con plantas nativas tropicales para el tratamiento de lixiviado de rellenos sanitario. (2016). Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70357/fichero/9.+MARCO+TEORICO.pdf>
- REMTAVARES. En búsqueda de la eliminación de metales pesados, 2009. Disponible en: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2009/05/11/117987>
- MORALES, Claudia Johana: Estudio para remoción de metales pesados en los lixiviados de rellenos sanitarios. Otra thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales. (2007). Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1073/1/claudiajohanamorales.2007.pdf>
- SINIA. Gobernación de Chile CONAMA. Tecnologías de membrana, electrodiálisis, 2016. Disponible en: [http://www.sinia.cl/1292/articles-49990\\_24.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_24.pdf)
- GENERAL WATER COMPANY, Argentina. Sistema de ultrafiltración de agua. (2016). Disponible en: <https://gwc.com.ar/tienda/ultrafiltracion-hidrolit-uf-zen/>
- LLANOS L., J. - . Recuperación selectiva de metales pesados mediante ultrafiltración apoyada con polímeros, (2010). Disponible en: <https://ruidera.uclm.es/xmlui/handle/10578/2798>

- SOCIEDAD PÚBLICA DEL GOBIERNO VASCO. Gobierno Vasco en el desarrollo de la política ambiental y la extensión de la cultura de la sostenibilidad ambiental en la Comunidad. (2016). Disponible en: <http://www.ihobe.net/Paginas/Ficha.aspx?IdMenu=bb9ecfa1-1348-4874-ab1b-93d030674ff3&Idioma=es-ES>
- CAMARILLO, Rafael. Separación selectiva de metales pesados en efluentes industriales mediante tecnología psu. (2007). Disponible en: <https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/961/228%20Separación%20selectiva%20de%20materiales%20pesados%20en%20efluentes%20industriales%20mediante%20tecnología.pdf?sequence=1>
- ALIBABA-CO, listado de productos, (2016). Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/aok-505-ultra-filtration-countertop-fluoride-water-removes-chlorine-lead-mercury-chloramine-bacteria-solids-sulfide-radiation-60207172641.html>
- FUNDACIÓN NUESTROMAR, Tecnología nacional para purificar el agua. (2007). Disponible en: [http://www.nuestromar.org/noticias/ciencia\\_tecnologia\\_y\\_educacion6265\\_022007\\_tecnologia\\_nacional\\_para\\_purificar\\_el\\_agua](http://www.nuestromar.org/noticias/ciencia_tecnologia_y_educacion6265_022007_tecnologia_nacional_para_purificar_el_agua)
- AGUAMARKET Y CÍA. LTDA. Productos y Servicios para la Industria del Agua Iberoamericana (2016). Disponible en: <http://www.aguamarket.com/sql/temas-interes/246.asp>
- DIARIO LA NUEVA PROVINCIA SRL, Argentina. Acciones en procura de una vida sana Tecnología nacional para purificar el agua. Publicada en Febrero del 2007. Disponible en: <http://www.lanueva.com/sociedad-impresa/578869/-tecnolog-237-a-nacional-para-purificar-el-agua-.html>
- ECURED. Magnetita (2016). Disponible en: <http://www.ecured.cu/Magnetita>
- REMTAVERES. Nuevas investigaciones para la eliminación de metales pesados. 2014. Disponible en: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2014/06/11/132027>
- MARTINEZ, Laura. Nanopartículas de oro para reducir la contaminación del agua. (2016). Disponible en: <http://www.muyinteresante.es/innovacion/articulo/nanoparticulas-de-oro-para-reducir-la-contaminacion-del-agua-511392372257>
- VALENCIA, 11 Feb. (EUROPA PRESS). Innova.- AIMME desarrolla un filtro con nanopartículas de oro para reducir la contaminación del agua. Disponible en: <http://www.europapress.es/comunidad-valenciana/innova-00214/noticia-innova-aimme-desarrolla-filtro-nanoparticulas-oro-reducir-contaminacion-agua-20140211110926.html>

- MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO, Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011. Utilizarán algas para filtrar metales pesados del agua. (2008). Disponible en: <http://www.dicyt.com/noticias/utilizaran-algas-para-filtrar-metales-pesados-del-agua>
- N Y F, de COLOMBIA. Información técnica del filtro UVW – 15 (2015). Disponible en: <http://www.nyfdecolombia.com/uv/uvw15>
- LINARES, Andrea. Preparan un carbon activado nacional para descontaminar agua. Publicado el 13 de abril del 2013. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-12739601>
- AGUATEC S.A.S, agua y tecnología. Osmosis inversa (OI), (2016). Disponible en: [http://www.aguatec.com.co/images/stories/fichas\\_tec/%C3%93smosis%20Inversa1.pdf](http://www.aguatec.com.co/images/stories/fichas_tec/%C3%93smosis%20Inversa1.pdf).
- Distribuidora y Aliados, productos químicos – materias primas. Itagüí (Antioquia), 2016. Sulfato de aluminio. Disponible en: <http://www.distribuidoraaliados.com/portfolio-items/sulfato-de-aluminio-granulado-liquido/#prettyPhoto>
- Guangzhou Chemxin Environmental Material Co., Ltd. Zeolita en polvo utilizada en resina, (2016). Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/2-4um-4a-activated-zeolite-molecular-sieve-powder-used-in-resin-60501489495.html>
- Shanghai Guangji Industrial Co., Ltd. Shanghai, China (Continental). Zeolita tamiz molecular 4a esférica resina poliéster de secado, (2016). Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail-img/zeolita-tamiz-molecular-4a-esf-rica-resina-poliester-de-secado-60152270598.html>
- Gongyi City Meiqi Industry & Trade Co., Ltd. China (Mainland) | Trading Company, (2016). Zeolita natural Clinoptilolite. Disponible en: [https://www.alibaba.com/product-detail/clinoptilolite-High-CEC-green-nature-zeolite\\_60492975102.html?spm=a2700.7735675.30.19.pzqc3p&s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/clinoptilolite-High-CEC-green-nature-zeolite_60492975102.html?spm=a2700.7735675.30.19.pzqc3p&s=p)
- La Leñería, venta de leña, carbón y bioetanol, (2016) .Carbón activado granular. Disponible en: [http://laleneria.com/carbon-a-domicilio-bogota.html\\_21](http://laleneria.com/carbon-a-domicilio-bogota.html_21)
- Zhangjiagang Fillex Packaging Machinery Co., Ltd. China. Equipo con membrana de ultrafiltración, (2016). Disponible en: [http://es.made-in-china.com/co\\_fillex2008/product\\_Hollow-Fiber-Ultrafiltration-Membrane-for-Water-Treatment\\_eeneorsgg.html](http://es.made-in-china.com/co_fillex2008/product_Hollow-Fiber-Ultrafiltration-Membrane-for-Water-Treatment_eeneorsgg.html)
- Zhangjiagang City New Crown Machinery Co., Ltd. China. Equipo de electrodiálisis, (2016). Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/2016-hot-sale-electrodialysis-pure-mineral-small-water-treatment-plant-price-60474525453.html>

