



Presencia de mercurio en agua de consumo humano: una revisión del estado del arte

María Camila Herrera Vergara

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniera Sanitaria

Asesora

Yudy Andrea Londoño Cañas, Doctor (PhD) en Ingeniería Ambiental

Asesor Externo

Gustavo Antonio Peñuela Mesa, Doctor (PhD), Coordinador GDICON

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Sanitaria

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	(Herrera, 2024)
Referencia	(Herrera, 2024). <i>Presencia de mercurio en agua de consumo humano: una revisión del estado del arte, 2023-2024</i> [Informe de práctica]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	6
Abstract	7
Introducción	8
1 Planteamiento del problema	9
1.1 Antecedentes	9
2 Justificación.....	11
3 Objetivos	12
3.1 Objetivo general	12
3.2 Objetivos específicos.....	12
4 Marco teórico	13
5 Metodología	15
6 Estado del arte	17
7 Discusión	20
8 Conclusiones	21
Referencias	22

Lista de tablas

Tabla 1 Resultados por palabras claves.....	15
Tabla 2 Métodos y eficiencias de remoción.....	20

Lista de figuras

Figura 1 Artículos encontrados en scopus por países	16
--	----

Resumen

El mercurio es un contaminante peligroso que puede ingresar al suministro de agua por medio de forma natural y antropogénica, y su exposición crónica se ha relacionado con problemas graves de salud, especialmente en el sistema nervioso central y en el desarrollo infantil. En este estudio se hizo una revisión bibliográfica sobre la presencia de mercurio en agua de consumo humano, donde fue importante resaltar los efectos adversos a la salud humana asociados con la exposición al mercurio a través del agua de consumo humano y la efectividad de cada uno de los sistemas de remoción de mercurio reportados en la literatura. Donde se usaron bases de datos y buscadores de artículos académicos. Los resultados de esta revisión bibliográfica de los métodos más eficaces para la remoción de mercurio en agua de consumo humano fueron la osmosis inversa, coagulación-floculación, ultrafiltración, precipitación química, adsorción carbón activado e intercambio iónico.

Palabras clave: mercurio, agua potable, calidad del agua, salud humana

Abstract

Mercury is a dangerous contaminant that can enter the water supply naturally and anthropogenically, and chronic exposure has been linked to serious health problems, especially in the central nervous system and childhood development. In this study, a bibliographic review was carried out on the presence of mercury in water for human consumption, where it was important to highlight the adverse effects on human health associated with exposure to mercury through water for human consumption and the effectiveness of each of them. mercury removal systems reported in the literature. Where databases and search engines for academic articles were used. The results of this bibliographic review of the most effective methods for removing mercury from water for human consumption were reverse osmosis, coagulation-flocculation, ultrafiltration, chemical precipitation, activated carbon adsorption and ion exchange.

Keywords: mercury, drinking water, water quality, human healths.

Introducción

El mercurio es un metal pesado que puede contaminar fuentes de agua, especialmente en regiones donde se llevan a cabo actividades industriales o de minería que liberan mercurio al medio ambiente. Cuando las personas ingieren agua contaminada con mercurio, ya sea en forma de metilmercurio (que penetra en el cuerpo humano por vía oral), puede tener graves efectos en la salud humana. Por esta razón, la exposición al mercurio a través del consumo de agua potable es una preocupación importante en la salud pública (Morel et al., 1998). La actividad humana hasta la fecha ha provocado la liberación de cientos de miles de toneladas de mercurio al medio ambiente. Se estima que el nivel de mercurio en la atmósfera es ahora cinco veces mayor que el nivel natural y la concentración de mercurio en los océanos es aproximadamente el doble que el nivel natural. Por lo tanto, se presta mucha atención a la propagación del mercurio en todos los compartimentos medioambientales, este elemento químico ha sido agregado a la lista de contaminantes prioritarios por varias organizaciones y programas destinados a reducir la emisión de metales pesados al medio ambiente (Jabłońska & Kluska, 2020).

Al ser una potente neurotoxina, el mercurio es particularmente peligroso para los fetos, bebés y niños pequeños en desarrollo, con efectos resultantes que incluyen retrasos en el aprendizaje y las funciones motoras, el mercurio se acumula en el cuerpo con el tiempo, provocando problemas de visión periférica, alteraciones de las sensaciones (hormigueo, entumecimiento), normalmente en las manos y los pies y, a veces, alrededor de la boca, alteraciones del habla, la audición, la marcha y la escritura, así como alteraciones mentales. Si no se produce una exposición adicional, puede excretarse del cuerpo durante un período de cuatro a cinco meses (Reis et al., 2009). Existen varias tecnologías para la remoción de mercurio; entre éstas se incluyen precipitación química, coagulación, osmosis inversa, intercambio iónico y adsorción con carbón activado (Benavente et al., 2007). En consecuencia, es importante realizar una revisión del estado del arte sobre la presencia de mercurio en agua de consumo humano resaltando los efectos adversos a la salud humana asociados con la exposición al mercurio a través del agua de consumo humano y la efectividad de cada uno de los sistemas de remoción de mercurio reportados en la literatura.

1 Planteamiento del problema

El agua del ecosistema es vulnerable a la contaminación por mercurio y puede pasar directamente a la cadena alimentaria. Los niveles de mercurio encontrados en lagos, ríos y arroyos no superan normalmente los $0,1\mu\text{g/l}$, pero en áreas cercanas a concentraciones de fuentes minerales de mercurio naturales el nivel se puede elevar hasta superar los $80\mu\text{g/l}$. Además, es posible encontrar niveles superiores de contaminación por mercurio en el agua debido a la contaminación procedente de los residuos industriales y urbanos sin tratar, el drenaje de aguas residuales al subsuelo, el uso de cantidades excesivas de fertilizantes o pesticidas y otras prácticas agrícolas (Cabrera-Vique et al., 2007).

De acuerdo con datos y estudios de la Organización mundial de la salud la exposición al mercurio, incluso en pequeñas cantidades, puede causar graves problemas de salud y es peligrosa para el desarrollo intrauterino y en las primeras etapas de vida, por ello la Organización sitúa el mercurio como uno de los diez productos o grupos de productos químicos que plantean especiales problemas de salud pública (Claudia Gafner-Rojas, 2018).

1.1 Antecedentes

Se han presentado diferentes eventos de intoxicación por mercurio, como el ocurrido en la Bahía de Minamata, en Japón (1940-1950), donde la empresa Chisso Company Ltda. Utilizaba mercurio metálico para el procesamiento de cloruro de polivinilo(pvc) y vertía los desechos tóxicos a las aguas del mar; el primer caso fatal se presentó en 1953, y en 1956 donde se detectó un brote en el que murieron 46 personas y ocurrieron muertes de mascotas y pájaros, entre 1953 y 1965 se presentaron 181 víctimas mortales, 2939 casos confirmados de intoxicación por mercurio y 12710 enfermos no confirmados (Bogotá & Bogotá, 2011).

El Instituto nacional de salud reportó 1126 casos de intoxicación por mercurio en Colombia entre 2013 y 2015, en 18 departamentos y 59 municipios del país. Es preciso en este sentido tener en cuenta que no todos los casos de intoxicación, y en general los problemas de salud generados por el mercurio son registrados, por un lado, por las dificultades de diagnóstico y, por otro, por las amenazas e intimidaciones que han sufrido algunos pobladores que asocian sus problemas de salud al mercurio, estos problemas incluyen ceguera, malformación fetal, parálisis, pérdida de memoria,

temblores, daños neurológicos, insomnio, hipertensión, palpitaciones, impotencia, úlceras, náuseas y sangrado intestinal y evidentemente los más vulnerables son los niños y las madres gestantes (Claudia Gafner-Rojas, 2018).

2 Justificación

La justificación de este trabajo de practica se fundamenta en la creciente preocupación global sobre la presencia de mercurio en sistemas de acueducto y fuentes de abastecimiento de agua, así como en la necesidad de recalcar los riesgos asociados a la salud humana e identificar los métodos de remoción en sistemas de potabilización que puedan ser más efectivos. La elección de este tema se basa en la relevancia de abordar un problema ambiental y de salud pública que afecta a comunidades en todo el mundo, lo cual, desde el área de la Ingeniería Sanitaria, es de vital importancia el conocimiento sobre la extensión de la contaminación por mercurio a nivel mundial a través de diferentes matrices de agua, así como los riesgos para la salud. Lo anterior es esencial para la toma de decisiones en torno a la gestión del recurso hídrico vital y la protección de la vida. El aporte significativo de este trabajo de práctica a la ingeniería radica en la generación de un cuerpo de conocimiento detallado y enfocado hacia la problemática del mercurio en sistemas de abastecimiento de agua para consumo humano. Esta información puede servir como base para el diseño y desarrollo de estrategias de tratamiento y remoción más efectivas. Al comprender los riesgos y las limitaciones de los procesos de remoción de mercurio existentes, los ingenieros y profesionales en el campo podrán trabajar hacia soluciones más eficientes y sostenibles en la gestión del agua de consumo humano. Además, esta investigación busca contribuir a tomar conciencia sobre la importancia de controlar y mitigar la presencia de mercurio en los sistemas de abastecimiento de agua, promoviendo la seguridad y la calidad del agua de consumo humano para las comunidades en todo el mundo.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Realizar una investigación documental sobre la presencia de mercurio en agua para consumo humano.

3.2 Objetivos específicos

- Documentar el estado del arte sobre la presencia de mercurio en agua para consumo humano, a través de una búsqueda bibliográfica acerca de cómo el mercurio ingresa a las diferentes matrices de agua destinadas para consumo humano.
- Analizar los posibles efectos adversos para la salud humana asociados con la exposición al mercurio a través del agua de consumo humano.
- Comparar la efectividad de cada uno de los sistemas de remoción de mercurio reportados en la literatura.

4 Marco teórico

El mercurio es un metal blanco plateado muy tóxico, el único en estado líquido a 0°C, muy denso y poco compresible; de tensión superficial muy alta y débil reacción calorífica, posee gran capacidad de amalgamar a casi todos los metales. Se evapora a 13°C y encontramos trazas de él en cualquier producto que se analice. No es esencial para ningún proceso biológico, pero se acumula en la mayoría de los seres vivos (Ramírez, 2013).

Las fuentes de liberación del mercurio son principalmente de dos tipos: naturales y antropogénicas. Las fuentes naturales incluyen la actividad volcánica y la erosión de rocas; Las fuentes antropogénicas, que representan el 85% de las emisiones de mercurio, provienen de la presencia de mercurio en materias primas como combustibles fósiles y diversas industrias, como la manufactura de papel, productos médicos, lámparas fluorescentes, cementeras, y otras actividades como la cremación y la pintura. Además, las liberaciones antiguas de mercurio depositadas en suelos y sedimentos pueden volver a la atmósfera como parte de los ciclos biológicos. Los hospitales contribuyen con aproximadamente el 4-5% de las emisiones de mercurio en aguas residuales, y la incineración de residuos médicos es una fuente significativa de contaminación por mercurio (Gaioli et al., 2012).

La forma más tóxica de este elemento es el metilmercurio, debido a que esta forma orgánica facilita su acceso y acumulación en seres vivos (Ambas et al., 2013). El metilmercurio es un compuesto neurotóxico capaz de concentrarse en el organismo y concentrarse así mismo en las cadenas alimentarias (Morel et al., 1998). Dependiendo de la exposición, el mercurio puede causar efectos tanto agudos como crónicos; sin embargo, el envenenamiento agudo ahora es poco común; la exposición a corto plazo al mercurio y sus compuestos puede afectar el tracto respiratorio, el sistema nervioso, los riñones y el tracto gastrointestinal; dependiendo de la toxicidad y concentración de Mercurio, los efectos en la salud humana pueden incluir cáncer, mutaciones en el ADN, alteraciones en la función cardíaca, daños al sistema nervioso central y daños a las células sanguíneas y órganos como el hígado, los riñones y los pulmones, entre otros (Mestanza-Ramón et al., 2023). En Colombia el valor máximo aceptable de mercurio en agua para consumo humano es de 0,001mg/L (Ambiente & Territorial, 2007). La eliminación del mercurio del agua es un proceso

complicado ya que el mercurio no puede convertirse en una forma inofensiva. Sin embargo, se han informado muchos experimentos para remediar el mercurio de las soluciones acuosas, por ejemplo, coagulación-floculación, ultrafiltración, adsorción con carbón activado, intercambio iónico, reducción química o precipitación y ósmosis inversa (Rani et al., 2021).

5 Metodología

Se llevó a cabo un análisis bibliométrico a través de palabras claves. En el proceso de revisión se tuvo en cuenta todos los sistemas de remoción de mercurio que hayan sido concluyentes. No se impuso restricciones geográficas o de lenguaje, y se hizo uso de traductores de texto para acceder a la información en idiomas diferentes al español y al inglés. Las palabras claves para la búsqueda incluyeron “drinking and wáter”, “mercury”, “inverse osmosis”, “ion exchange”, “coagulation”, “ultrafiltration”, “activated carbon”, “inverse osmosis”, “chemical precipitation”, para la base de datos scopus, lo cual esta arrojó resultados para diferentes revistas como SCIELO, SCIENCE DIRECT, SPRINGER, AWWA, DIALNET.

Se realizó la búsqueda a través de Scopus mediante el uso de algunas combinaciones de palabras, obteniendo mayores resultados realizando la búsqueda con palabras clave en inglés, así como se observa en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados por palabras claves

Palabras Claves	Resultado
mercury, drinking water, inverse osmosis	19
mercury, drinking water, ion exchange	56
mercury, drinking water, coagulation	17
mercury, drinking water , ultrafiltration	4
mercury, drinking water ,Activated carbon	54
mercury, drinking water, chemical precipitation	42

Mediante el uso de las palabras clave “Drinking and Water” y “Mercury” se encontró que Estados Unidos y China son los países con más artículos publicados sobre el tema, teniendo China más de 250 artículos publicados

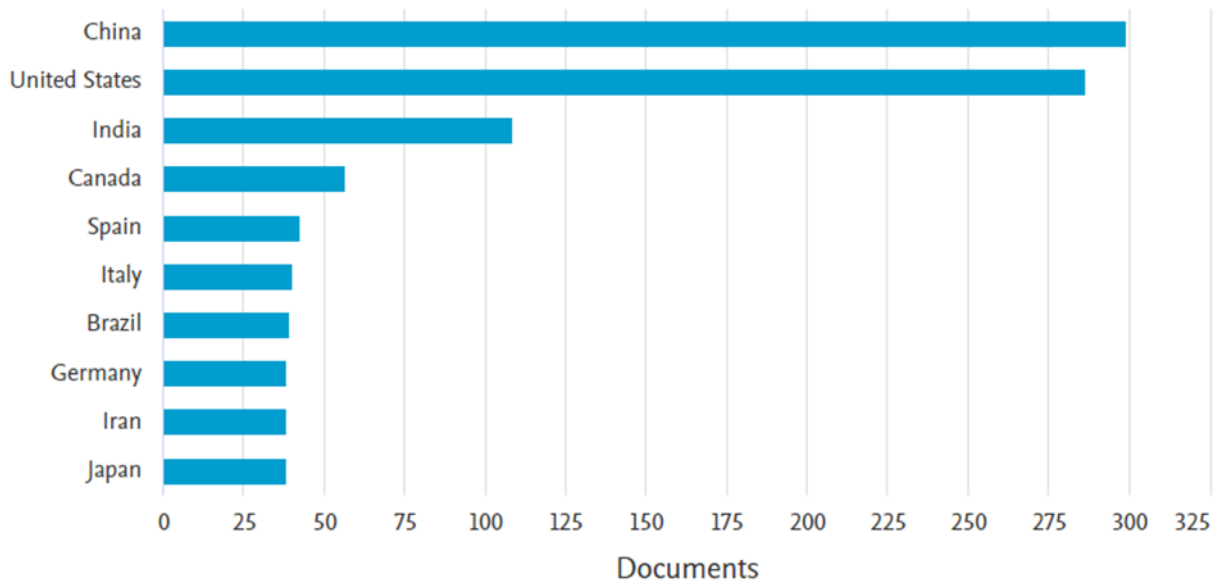


Figura 1 Artículos encontrados en Scopus por países

6 Estado del arte

6.1 Adsorción con carbón activado

La adsorción es un proceso de separación mediante el cual ciertos componentes en fase fluida se transfieren hacia un sustrato sólido, quedando física o químicamente enlazados a la superficie del adsorbente. El carbón activado se utiliza en procesos de adsorción debido a su elevada área superficial, alta capacidad de adsorción, estructura porosa y eficiencia. El carbón activado se produce, por métodos físicos o químicos, a partir de muchos precursores sólidos carbonosos. Este material puede emplearse en sistemas de lecho fijo, que consisten en una columna donde el adsorbente se deposita en su interior como un lecho y el líquido atraviesa la columna en sentido ascendente, horizontal o descendente. En el tratamiento de aguas, el líquido fluye y los contaminantes se separan gradualmente (Rojas et al., 2012). El proceso de adsorción con carbón activado remueve un 75% (Lara, 2022).

6.2 Coagulación-floculación

el tratamiento convencional de coagulación–floculación 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. 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 (Yoon, 2014).

6.3 Ultrafiltración

Entre las tecnologías de filtración por membrana, la ultrafiltración (UF) se considera una de las tecnologías favoritas para recuperar aguas residuales o desempeña el papel de unidad de pretratamiento para otras tecnologías de tratamiento de agua. La ultrafiltración impulsada por gravedad (GDU) se conoce como un proceso de filtración por membrana que requiere una energía mínima durante la filtración. En el sistema de membrana GDU, el agua pasará a través de la membrana en función de la presión hidrostática mientras se pueden eliminar los microorganismos y algunos contaminantes de mayor tamaño. En ese caso, se deben lograr membranas con un tamaño de poro óptimo que equilibre el flujo (fuerza impulsora) y la eficiencia de eliminación (Ishak et al., 2022). Los procesos de ultrafiltración remueven por encima del 90% el mercurio, lo que significa

reducir costos de disposición o reciclado de un 10%, necesita un mínimo de energía para su funcionamiento y poca atención del operador. Son de capacidad variable, ya que van de 50 a 180 000 galones por día (Lopez, 2002)

6.4 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, 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 (Yoon, 2014). Chiarle, Ratto y Rovatti estudiaron el proceso de adsorción de mercurio por resinas de intercambio iónico, determinaron la eficiencia de adsorción, el efecto del pH y la cinética de adsorción en un reactor batch agitado mecánicamente bajo condiciones casi isotérmicas (más o menos 0,1°C); la resina utilizada fue duolita GT-73, una resina quelante macroreticular con grupos funcionales tioln(-SH); esta resina alcanzo una eficiencia de adsorción de 30-40% en peso y la eficiencia disminuye a medida que la concentración inicial de mercurio se incrementa (Jimenez, 2005).

6.5 Precipitación química

Es una técnica económica y selectiva en cuanto a su proceso, sin embargo, a nivel de mantenimiento esta técnica si resulta costosa debido a la alta generación de lodos por parte de esta. Entre los tratamientos de precipitación química más usadas esta la precipitación por hidróxidos, la cual es una técnica de bajo costo, fácil control del pH y eliminación por floculación y sedimentación, aunque también se usa precipitación por sulfuros la cual presenta solubilidades

bajas y precipitados no anfóteros. En algunos casos se han empleado agentes quelatantes aunque estos últimos presentan desventajas significativas, como la carencia de uniones necesarias, además de demasiados riesgos a nivel ambiental. Con el fin de formar un precipitado del metal, los agentes químicos adicionados a la solución alteran el pH con el fin de impedir que el precipitado se disuelva en la solución, luego por proceso de sedimentación, estos precipitados son aislados y la solución restante es usada para otros propósitos (Pabón et al., 2020). La precipitación química presenta una gran aplicabilidad a bajo costo en plantas de potabilización removiendo mercurio en un 97% (Alvarez, 2016).

6.6 Osmosis inversa

Se trata de un proceso con membranas, en el cual se aplica una presión mayor a la presión osmótica, esta presión es ejercida en el compartimiento que contiene la más alta concentración de sólidos disueltos. Esta presión obliga al agua a pasar por la membrana semi-permeable en dirección contraria al del proceso natural de osmosis, dejando las impurezas detrás. La permeabilidad de la membrana puede ser tan pequeña, que prácticamente todas las impurezas, moléculas de la sal, bacterias y los virus, son separados del agua (Hernández, 2020). La osmosis inversa es un proceso que permite adaptarse a las diferentes necesidades de caudal y contaminantes que se presenten. Al respecto, esta tecnología ha sido evaluada para remover metales pesados del agua incluyendo el mercurio y aplicando sistemas simples (entrada-salida) con los cuales se han registrado porcentajes de remoción superiores al 85 % del permeado (Zúñiga-Martínez et al., 2022).

7 Discusión

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. Por otro lado, para un buen proceso de remoción de mercurio se utiliza la adsorción con carbón activado, para este proceso, se debe tener en cuenta la capacidad de remoción y la vida útil de las columnas es decir área superficial, tamaño de poro, grupos superficiales y capacidad de intercambio iónico, como también de la geometría de la columna, de la concentración del adsorbible, de la velocidad de flujo, de la altura del lecho del adsorbente y de la naturaleza misma del drenaje. La ultrafiltración se perfila como herramienta clave para eliminar partículas de mercurio con mayor tamaño, en el proceso de intercambio iónico, la resina de intercambio se carga con iones que tienen una mayor afinidad por el mercurio que los iones presentes en el agua. Cuando el agua pasa a través de la resina, los iones de mercurio son reemplazados por los iones en la resina. Otro proceso importante es la precipitación química el cual este proceso, se agregan productos químicos al agua que reaccionan con el mercurio para formar un precipitado insoluble, que luego puede ser separado del agua. Además, se aborda la osmosis inversa como un proceso eficaz ya que es un proceso de tratamiento del agua que puede ser efectivo para eliminar una amplia gama de contaminantes, incluido el mercurio. En la tabla 2 se presentan los porcentajes de remoción reportados en la literatura y anteriormente mencionados en la revisión del estado del arte.

Tabla 2. Métodos y eficiencias de remoción

Método de remoción	Eficiencia de remoción	Fuente
Adsorción con carbón activado	75%	Lara, 2022
Coagulación-floculación	70-80%	Yoon, 2014
Ultrafiltración	90%	López, 2002
Intercambio iónico	30-40%	Jiménez, 2005
Precipitación química	97%	Álvarez, 2016
Osmosis inversa	>85%	Zuñiga-Martinez et al, 2022

8 Conclusión

La revisión del estado del arte sobre la presencia de mercurio en agua de consumo humano resalta la diversidad de métodos disponibles para la remoción de este contaminante, entre los cuales se incluyen la osmosis inversa, precipitación química, intercambio iónico, coagulación-floculación, adsorción con carbón activado y ultrafiltración. Cada técnica presenta ventajas y limitaciones específicas, destacando la importancia de seleccionar cuidadosamente el método más apropiado en función de las características particulares del agua para consumo humano a tratar. La combinación de enfoques y la adaptación a condiciones locales pueden ser clave para garantizar la eficacia de los sistemas de tratamiento, subrayando la necesidad de investigaciones continuas y desarrollos tecnológicos que mejoren la eficiencia y la accesibilidad de estas soluciones para salvaguardar la calidad del agua potable y la salud pública.

Referencias

- Alvarez. (2016). alternativas de potabilizacion para aguas contaminadas con mercurio.
- Ambas, D., Un, C. D. E., Inusual, E., & Mercurio, E. L. (2013). De Un Elemento Inusual : El. 3946, 25–26.
- Ambiente, M. D. E., & Territorial, V. Y. D. (2007). Resolución 2115 de 2007. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO. Ministerio De La Protección Social, Ministerio De Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial, 2007(2), 23.
- Benavente, M., Sjören, A., & Martínez, J. (2007). Remoción de mercurio de efluentes mineros por biosorción: un caso de estudio en la ciudad de La Libertad, Chontales, Nicaragua. *Nexo Revista Científica*, 20(2), 47–55.
- Gaioli, M., Amoedo, D., & González, B. D. (2012). Impacto del mercurio sobre la salud humana y el ambiente. In *Archivos Argentinos de Pediatría* (Vol. 110, Issue 3, pp. 259–264). <https://doi.org/10.5546/aap.2012.259>
- Jabłońska, J., & Kluska, M. (2020). Determination of Mercury Content in Surface Waters Using an Environmentally Non-Toxic Terminating Electrolyte. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 105(4), 626–632. <https://doi.org/10.1007/s00128-020-02992-w>
- Jimenez. (2005). Interaccion del mercurio con los componentes de las aguas residuales. *17-19*.
- Mestanza-Ramón, C., Jiménez-Oyola, S., Montoya, A. V. G., Vizuite, D. D. C., D’Orio, G., Cedeño-Laje, J., & Straface, S. (2023). Assessment of Hg pollution in stream waters and human health risk in areas impacted by mining activities in the Ecuadorian Amazon. *Environmental Geochemistry and Health*. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01597-6>

- Morel, F. M. M., Kraepiel, A. M. L., & Amyot, M. (1998). THE CHEMICAL CYCLE AND BIOACCUMULATION OF MERCURY. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29(1), 543–566. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.29.1.543>
- Pai. (2022). Examinar material documental sobre la remoción del mercurio (Hg+2) en disoluciones acuosas utilizando bioadsorbentes orgánicos. 2005–2003, 8.5.2017, γ. www.aging-us.com
- Ramírez, A. V. (2013). Intoxicación ocupacional por mercurio. *Anales de La Facultad de Medicina*, 69(1), 46. <https://doi.org/10.15381/anales.v69i1.1184>
- Rani, L., Srivastav, A. L., & Kaushal, J. (2021). Bioremediation: An effective approach of mercury removal from the aqueous solutions. *Chemosphere*, 280(April). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130654>
- Reis, A. T., Rodrigues, S. M., Araújo, C., Coelho, J. P., Pereira, E., & Duarte, A. C. (2009). Mercury contamination in the vicinity of a chlor-alkali plant and potential risks to local population. *Science of the Total Environment*, 407(8), 2689–2700. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.10.065>
- S. E. Pabón, R. Benítez, R. A. Sarria-Villa, & J. A. Gallo. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9–18.
- Zúñiga-Martínez, S., Ibáñez-Hernández, O. F., Salas Plata-Mendoza, J. A., Flores-Tavizón, E., & Velázquez-Angulo, G. (2022). Métodos de remoción de metales en aguas para consumo humano: Una revisión. *Cultura Científica y Tecnológica*, 19(2), 12–27. <https://doi.org/10.20983/culcyt.2022.2.3.1>