

ARTÍCULOS

La electroquímica como alternativa en el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados

Electrochemistry as an alternative for the treatment of water contaminated with heavy metals

Daysi Elusá Millán Ocampo

0000-0003-2769-9408, daysi.millanoca@uaem.edu.mx

Investigadora posdoctoral, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAP), Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM)

Shirley Irazoque Castañeda

0000-0002-0046-496X, sic@ier.unam.mx

Investigadora posdoctoral, CIICAP, UAEM

Arianna Parrales Bahena

0000-0001-8554-8777, arianna.parrales@uaem.mx

Cátedras CONAHCYT, CIICAP, UAEM

Susana Silva Martínez

0000-0003-3302-4984, ssilva@uaem.mx

CIICAP, UAEM

José Alfredo Hernández Pérez

0000-0002-2107-3044, alfredo@uaem.mx

CIICAP, UAEM

RESUMEN

La contaminación del agua por metales pesados es un problema ambiental de gran preocupación, debido a los efectos perjudiciales que pueden tener en la salud humana y en los ecosistemas acuáticos. Los metales pesados, como el plomo, el cadmio, el mercurio y el cromo, son altamente tóxicos y pueden acumularse en los organismos vivos, causando daños irreparables. Ante esta problemática, es fundamental encontrar soluciones eficientes y sostenibles para eliminar estos contaminantes del agua. En el presente trabajo, haremos una revisión de los métodos electroquímicos más utilizados para tratar aguas contaminadas con metales pesados, y cómo estos ofrecen una solución efectiva y respetuosa con el medio ambiente.

PALABRAS CLAVE

contaminación, residuos tóxicos, electroquímica

ABSTRACT

Heavy metal contamination of water is an environmental problem of great concern, due to the detrimental effects it can have on human health and aquatic ecosystems. Heavy metals, such as lead, cadmium, mercury, and chromium, are highly toxic and can accumulate in living organisms, causing irreparable damage. Faced with this problem, it is essential to find efficient and sustainable solutions to eliminate these contaminants from water. In this paper, we will review the most widely used electrochemical methods to treat water contaminated with heavy metals, and how they offer an effective and environmentally friendly solution.

KEYWORDS

pollution, toxic waste, electrochemistry

Los metales pesados y sus consecuencias ambientales

Los metales pesados son elementos químicos que presentan una alta densidad y resultan tóxicos para los seres vivos, incluso en bajas concentraciones. Algunos ejemplos comunes son el mercurio (Hg), cadmio (Cd), plomo (Pb), cromo (Cr) y cobre (Cu), en orden decreciente de toxicidad (Shrestha et al., 2021). Estos metales se encuentran de forma natural en el medio ambiente, pero su liberación descontrolada por actividades humanas, como la minería, la industria manufacturera, la quema de combustibles fósiles, la industria metalúrgica y el uso de pesticidas y fertilizantes, ha llevado a su acumulación en cuerpos de agua, lo que representa una seria amenaza para la vida acuática y la salud humana (Kong et al., 2011).

Una vez liberados, estos metales pueden persistir en el entorno durante largos periodos y acumularse en los ecosistemas, y pueden ingresar al cuerpo humano a través de la inhalación de partículas en el aire, la ingesta de alimentos y agua contaminados o el contacto directo con materiales que los contienen. A continuación, describiremos algunos metales pesados con mayor relevancia.

Cobre

El cobre tiene una gran importancia comercial, y se sitúa en la tercera posición, detrás del hierro/acero y el aluminio. Sus aplicaciones se enfocan principalmente en aprovechar su excelente conductividad eléctrica y térmica, por ejemplo, en la elaboración de cables y contactos eléctricos, radiadores automovilísticos, intercambiadores de calor, paneles solares, tuberías, válvulas y accesorios de sistemas de agua y otros fluidos acuosos (Al-Saydeh et al., 2017; Khattab et al., 2013; Scott, 2001). Incluso en los seres humanos se considera esencial, pues se ubica en la tercera posición en cuanto a grado de concentración (80-150 mg en adultos) de metales traza, después del hierro y el zinc (Sandstead, 1975; Saloomons, 1985). Sin embargo, en exceso puede generar problemas gastrointestinales y trastornos metabólicos (Shrestha et al., 2021).

Cadmio

El cadmio es considerado como un metal no esencial y uno de los más tóxicos presentes en el medio ambiente. Tiene la capacidad de acumularse en los organismos vivos durante tiempos prolongados y, una vez que se ha ingerido, genera inhibición de la absorción de hierro y zinc en el sistema digestivo, así como daño renal. También puede producir cáncer al ser inhalado (Shrestha et al., 2021). Su uso más importante se da en baterías mezcladas con níquel, que son conocidas por su alto desempeño y bajo mantenimiento (Haider et al., 2021; Sadegh Safarzadeh et al., 2007; Vasudevan y Lakshmi, 2011).

Tabla 1**Límites máximos permisibles para contaminantes en aguas residuales**

Parámetros (mg L⁻¹)	Promedio mensual	Promedio diario	Instantáneo
Grasas y aceites	50	75	100
Sólidos sedimentables (mL L ⁻¹)	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo total	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

Fuente: DOF, 2014.

Mercurio

El mercurio es un elemento que podemos encontrar en estado natural formando parte de minerales. Sin embargo, su uso como catalizador en la extracción de metales preciosos, dispositivos electrónicos, pintura, entre otros, ha permitido que su presencia se expanda hacia los ecosistemas acuáticos y terrestres. Al ingerirse provoca problemas gastrointestinales y daño renal, además de tener mayores probabilidades de generar tumores benignos (Driscoll et al., 2013; Shrestha et al., 2021).

Regulaciones y medidas de control

Para evitar la contaminación por metales pesados se han implementado regulaciones y medidas de control en diferentes industrias y sectores. Esto incluye la reducción de emisiones y vertidos industriales, la implementación de prácticas de gestión adecuadas en la minería, el uso seguro y responsable de productos químicos y la vigilancia de los niveles de metales pesados en el agua potable y en los alimentos.

De acuerdo con la normatividad vigente en México, la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes que pueden ser descargados a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, los cuales se pueden observar en la tabla 1 (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2014). En lo que respecta a la potabilización del agua para uso y consumo humano, la NOM-127-SSA1-1994 establece los límites permisibles de calidad que se muestran en la tabla 2 (p. 4) (DOF, 2000).

Con el fin de cumplir con la normatividad vigente, es necesario implementar métodos de tratamiento de los efluentes contaminados con metales pesados provenientes de las

Tabla 2

Límites permisibles de calidad para la potabilización del agua

Característica	Límite máximo permisible (mg L⁻¹)
Arsénico	0.05
Cadmio	0.005
Cobre	2.00
Cromo	0.05
Hierro	0.30
Mercurio	0.001
Plomo	0.01
Zinc	5.00

Fuente: DOF, 2000.

industrias mencionadas anteriormente. Una de las alternativas es, precisamente, la aplicación de métodos electroquímicos, tal como lo describiremos a continuación.

Potencial de la electroquímica en el tratamiento de aguas contaminadas

La electroquímica es una disciplina científica que estudia las interacciones entre la electricidad y las reacciones químicas. En el contexto del tratamiento de aguas contaminadas, ofrece varias ventajas significativas. Los métodos electroquímicos son procesos ambientalmente amigables, ya que no requieren el uso de productos químicos adicionales para eliminar los metales pesados y son altamente eficientes y selectivos. Existen varias técnicas electroquímicas que se utilizan para el tratamiento de metales pesados. Entre las más destacadas se encuentran la electroflotación, electrodiálisis, electrocoagulación y electrodeposición.

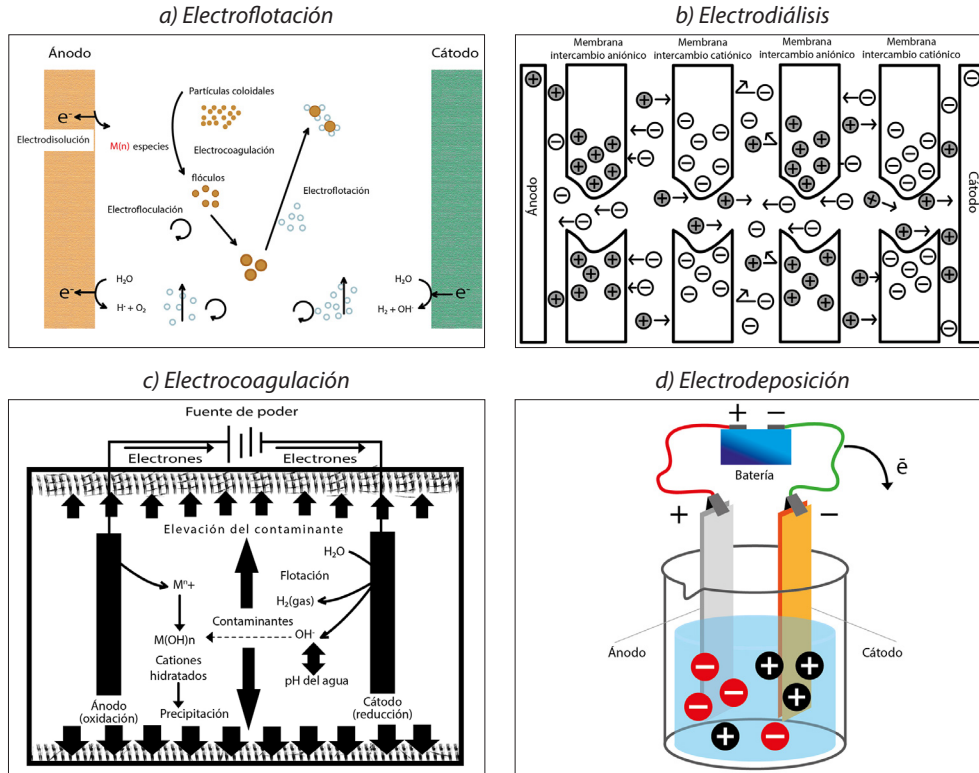
Electroflotación

En esta técnica, la corriente eléctrica se utiliza para generar burbujas de gas (hidrógeno) en el electrodo sumergido en el agua contaminada. Estas burbujas se adhieren a los contaminantes metálicos y forman flóculos que ascienden a la superficie del agua, donde se pueden retirar fácilmente mediante filtración (figura 1a, p. 5). Este método es especialmente eficaz para el tratamiento de aguas con partículas finas, coloides y concentraciones moderadas de metales pesados (Azimi et al., 2017; Carolin et al., 2017; Maarof et al., 2017; Qasem et al., 2021).

Este proceso se basa en la aplicación de una diferencia de potencial eléctrico, a través de una membrana selectiva de iones que divide el agua contaminada en dos compartimentos. Los iones metálicos migran a través de la membrana de intercambio iónico catiónico hacia el compartimento opuesto, debido a la atracción o repulsión eléctrica. Esto permite separar y concentrar los metales pesados (cationes +) en el compartimento donde se encuentra el cátodo (-), mientras que el agua tratada se recoge en el otro extremo (figura 1b, p. 5). Se utiliza

Figura 1

Esquemas generales de técnicas electroquímicas aplicables al tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados



Fuente: Holt et al., 2002; Prieto García et al., 2014; Sacarazzato et al., 2017.

cuando los metales están presentes en forma de iones y se requiere su separación selectiva (Al-Saydeh et al., 2017; Barakat, 2011; Carolin et al., 2017, Qasem et al., 2021; Shrestha et al., 2021).

Electrocoagulación

Esta técnica recurre a la aplicación de corriente eléctrica para generar coagulantes *in situ*. Los contaminantes suspendidos o emulsionados se neutralizan y luego se coagularán a partir de la fase acuosa. Las partículas de metales pesados se unen como pequeños imanes para formar una masa que se denomina lodo o flóculo, lo que facilita la separación del agua mediante un proceso adicional, como la filtración (figura 1c). Este método es altamente eficiente para la eliminación de una amplia gama de metales pesados en concentraciones relativamente altas y puede funcionar en un amplio rango de pH (Azimi et al., 2017; Maarof et al., 2017).

Tabla 3
Trabajos reportados para el tratamiento de metales pesados mediante métodos electroquímicos y convencionales

Referencia	Método electroquímico	Metales pesados	Tiempo de proceso	Material del electrodo/ Reactivo químico	Eficiencia de remoción (%)
Ciszewski et al., 2022.	Electrodeposición	Pb (II)	2 h	Acero	82
Kuleyin y Uysal, 2020.	Electrodeposición	Cu (II)	1 h	Cobre y acero inoxidable	66, 80
Ano et al., 2023.	Electrocoagulación	Pb (II) Cu (II)	1 h	Hierro	95.15 80.22
Vargas et al., 2023.	Electrocoagulación	Ni (II)	1.5 h	Aluminio	97.8
Merzouk et al., 2009.	Electroflotación	Fe (II) Pb (II) Ni (II) Cu (II)	5-15 min	Aluminio	93-99
Ali et al., 2023.	Electroflotación	Fe (II) Zn (II) Co (II) Cu (II) Ni (II)	30 min	Acero inoxidable	95-99
Arana Juve et al., 2022.	Electrodialisis	Pb (II)	1 h	Platino	99
Yi et al., 2022.	Electrodialisis	Mn (II) Cr (II) Cd (II) Pb (II)	2 h	Carbón	87-97
Ozverdi y Erdem, 2006.	Precipitación química	Cd (II) Pb (II) Cu (II)	2 h	Pirita	34.2, 94.2, 45.2
Ozverdi y Erdem, 2006.	Precipitación química	Cd (II) Pb (II) Cu (II)	2 h	Sulfuro de hierro	68.5-99.8
Yu et al., 2000.	Adsorción	Cu (II)	24 h	Aserrín	58.6-94.8
Hu et al., 2009.	Adsorción	Cr (VI)	165 h	MWCNT oxidado	50-100

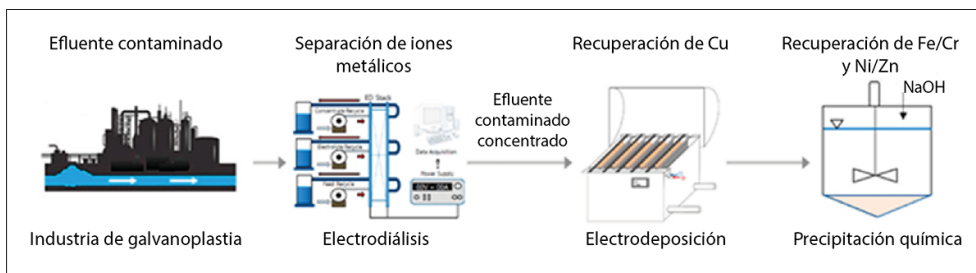
Fuente: Elaboración propia.

Electrodeposición

Para llevar a cabo la electrodeposición de metales pesados en aguas contaminadas, se utiliza una celda electrolítica que consta de dos electrodos: un ánodo y un cátodo. Al suministrar energía eléctrica a la celda se desarrollan los procesos de oxidación (ánodo) y reducción (cátodo), y se consigue que los iones metálicos presentes en el efluente se depositen sobre la superficie del cátodo. Esta técnica es efectiva incluso para bajas concentraciones de metales y puede funcionar en un amplio rango de pH (figura 1d, p. 5) (Azimi et al., 2017; Caroline et al., 2017; Higgs et al., 2022; Maarof et al., 2017; Qasem et al., 2021).

Figura 2

Tren de tratamiento para efluente proveniente de industria de galvanoplastia



Fuente: Kim et al., 2002.

Este tipo de procesos se pueden desarrollar de manera potencioestática, es decir, aplicando un voltaje fijo, o de forma galvanostática, esto es, aplicando una corriente fija y altas eficiencias de remoción. En principio, cualquier material conductor puede ser usado como electrodo; sin embargo, la selección del material se da en función del tipo de metal que se desee recuperar.

En la tabla 3 (p. 6) podemos observar algunos trabajos reportados en la literatura, enfocados en el tratamiento de efluentes contaminados con metales pesados mediante métodos electroquímicos y convencionales. De acuerdo con esta comparativa, los primeros generan eficiencias de remoción que van desde 60% a 99%, mientras que el tratamiento mediante precipitación química presenta porcentajes más bajos, de alrededor de 30%.

En cuanto a tiempos de proceso son similares, a excepción del método por adsorción, que requiere largos periodos para alcanzar el equilibrio, en lo que se han registrado tiempos de hasta 165 h, mientras en el proceso de electroflotación los periodos son muy cortos, incluso entre 5 y 15 minutos.

La selección de la técnica electroquímica adecuada para tratar aguas contaminadas con metales pesados depende de varios factores, como la naturaleza de los metales presentes, las concentraciones, el pH del agua, la disponibilidad de energía y los requisitos específicos del tratamiento. En algunos casos, puede ser necesario combinar diferentes técnicas o utilizar pretratamientos para optimizar la eficiencia del proceso. Además, es recomendable consultar a expertos en el campo de la electroquímica y la gestión del agua para obtener una recomendación específica para cada caso.

En la figura 2 se muestra un ejemplo de tren de tratamiento aplicable a efluentes provenientes de procesos de galvanoplastia. En la primer etapa del tratamiento se aplica electrodiálisis, con el fin de concentrar los iones cobre presentes en el efluente. Posteriormente, se implementa la electrodeposición, donde se obtiene el metal en estado puro mediante depósitos en el cátodo, lo que brinda la posibilidad de reutilizar este metal e incluso comercializarlo. Finalmente, se aplica precipitación química para recuperar el resto de los metales, como el hierro (Fe), cromo (Cr), níquel (Ni) y zinc (Zn) (Kim et al., 2022).

Tabla 4

Metodologías de tratamiento aplicables en la remoción de metales pesados

Tipo de tratamiento	Método de tratamiento	Ventajas	Desventajas	Referencias
Electroquímico	Electrocoagulación	Operatividad sencilla al generar coagulante <i>in situ</i> . Uso de reactivos "limpios" (electrones). Reducción de costos asociados a reactivos químicos. Menor cantidad de lodos residuales y flóculos más estables. Las burbujas generadas durante la electrólisis permiten separar el contaminante de forma sencilla. El sistema requerido es compacto y altamente eficiente.	Alto consumo de energía eléctrica. Requiere un tratamiento complementario para separar el hidróxido metálico, como filtración o sedimentación. Es necesario usar un electrolito altamente conductivo. Ocasionalmente, el ánodo requiere reemplazo. La pasivación del ánodo representa un desperdicio energético.	Azimi et al., 2017; Maarof et al., 2017.
Electroquímico	Electrodeposición	No requiere uso de reactivos químicos. No genera lodos residuales. Altas eficiencias de remoción. Posee una alta selectividad. Bajos costos de operación. Potencial para recuperar el metal en su estado puro.	Requiere personal especializado para crear un diseño de celda adecuado y optimizar los parámetros de operación. La generación de hidrógeno y reducción de oxígeno pueden disminuir la eficiencia.	Azimi et al., 2017; Caroline et al., 2017; Maarof et al., 2017; Qasem et al., 2021.
Electroquímico	Electroflotación	Altas eficiencias de remoción. Tiempos de proceso muy cortos. Adaptabilidad. Practicidad en cuanto a diseño y operatividad. Unidades de tamaño compacto.	Alto consumo de energía eléctrica. Requiere un pretratamiento de electrocoagulación y un tratamiento complementario para separar el contaminante, como filtración o sedimentación. Bajas eficiencias de remoción en concentraciones diluidas.	
Electroquímico	Electrodiálisis	Bajo consumo de productos químicos. Altos porcentajes de remoción.	Obstrucción y descamación de la membrana. Baja selectividad. Alto consumo de energía. Existen probabilidades de precipitación metálica.	Carolin et al., 2017; Qasem et al., 2021; Shrestha et al., 2021.
Fisicoquímico	Precipitación química	Fácil operatividad y automatización. Forma precipitados de "fácil" remoción mediante tratamientos adicionales.	Requiere demasiados reactivos químicos. Genera contaminantes secundarios tóxicos que requieren tratamiento. Requiere tratamientos complementarios, como filtración o sedimentación. No es apto para remover todo tipo de metales pesados y posee bajas eficiencias de remoción. Tiempos de proceso largos. Genera demasiados lodos residuales.	Azimi et al., 2017; Zamora Ledezma et al., 2021.
Fisicoquímico	Adsorción	Alta capacidad de adsorción. Los adsorbentes pueden regenerarse. El material adsorbente puede provenir de residuos de industria, agricultura o ser de origen natural.	Tiempos de proceso muy extensos para alcanzar el equilibrio. Únicamente funciona en intervalos de pH limitados. Baja selectividad. Produce contaminantes secundarios. La aglomeración de nanomateriales adsorbentes disminuye su efectividad.	Azimi et al., 2017; Shrestha et al., 2021; Zhu et al., 2019.
Fisicoquímico	Coagulación-floculación	Procesos de operación simples y relativamente económicos.	Bajas eficiencias de remoción. Altos costos asociados a reactivos químicos. Generación de contaminantes secundarios.	Carolin et al., 2017; Zamora Ledezma et al., 2021.

Fuente: Elaboración propia.

Cada uno de los tratamientos antes mencionados ofrecen ventajas y desventajas particulares. En la tabla 4 (p. 8) se resumen algunas de ellas para su comparativa. Los métodos electroquímicos, por su parte, ofrecen una solución que reduce el impacto ambiental con respecto a los métodos convencionales. Sin embargo, la mayor desventaja que presentan se centra en los altos consumos de energía. Por ello, se han desarrollado múltiples modificaciones en la superficie de los materiales con el propósito de potencializar sus propiedades de conductividad e incrementar el área superficial, principalmente, con lo que se ha conseguido mejorar su desempeño en la remoción de metales pesados y disminuir el consumo energético. A su vez, se podría considerar el uso de energías limpias que puedan reducir el costo asociado a este aspecto.

En cuanto a costos, desafortunadamente en la literatura rara vez se reporta este aspecto. Esto se debe a que resulta complicado comparar métodos de manera cuantitativa, pues los costos de proceso se encuentran en función de múltiples aspectos, como equipos, características del efluente a tratar, concentraciones y tipo de metal, consumo energético, calidad requerida del efluente tratado, entre otros (Kurniawan et al., 2006) En términos generales, los procesos electroquímicos reducen costos asociados al uso de reactivos químicos durante el tratamiento.

Además, al generar una mínima o nula cantidad de contaminantes secundarios se elimina el costo que implica la disposición/tratamiento de lodos, lo que, en casos particulares, resulta equiparable con los métodos tradicionales, pues el consumo de energía eléctrica con métodos electroquímicos suele ser alto. Pero en otros casos, a pesar del consumo energético requerido, se logra generar menores costos de proceso. Ejemplo de ello es el trabajo desarrollado por Meunier et al. (2006), donde se muestra un análisis comparativo entre electrocoagulación y precipitación química, en el que se encuentra que el método electroquímico es cinco veces más económico que el método fisicoquímico.

Conclusiones

Sin duda, la electroquímica resulta clave en el desarrollo de nuevas metodologías para la remediación de aguas residuales, pues brinda múltiples ventajas, incluyendo alta eficiencia de eliminación, versatilidad, baja/nula generación de residuos, y no requiere adición de reactivos químicos. Estas ventajas hacen que la electroquímica sea una opción atractiva para abordar problemas de contaminación del agua por metales pesados. A su vez, disminuye considerablemente los costos asociados al tratamiento de residuos y el uso de reactivos químicos, pues día con día se trabaja en el desarrollo de nuevos y mejores materiales que optimicen los tiempos de proceso y el consumo energético, lo que contribuye a la conservación del medio ambiente y la salud pública, pues el riesgo de estos contaminantes es muy alto.

Finalmente, es importante mencionar que, debido a los altos niveles de contaminación, el tratamiento de efluentes no es suficiente y está en nuestras manos colaborar activamente. Esto se puede lograr mediante el consumo responsable de productos que poseen estos contaminantes y, de ser posible, con la limitación de su uso.

Referencias

- Al-Saydeh, S. A., El-Naas, M. H. y Zaidi, S. J. (2017). Copper removal from industrial wastewater: a comprehensive review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 56, 35-44. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.07.026>
- Ali, I., Alyona, S., Tatiana, K., Anastasiya, G., Albishri, H. M. y Alshitari, W. H. (2023). Facile adsorption-electroflotation method for the removal of heavy metal ions from water using carbon nanomaterials. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 38970-38981. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24509-0>
- Ano, J., Koné, H., Yapo, N. S., Drogui, P., Yao, K. y Adouby, K. (2023). Removal of copper and lead by electrocoagulation process: effects of experimental parameters and optimization with full factorial designs. *J. Mater. Environ. Sci*, 14(2), 173-183. https://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol14/vol14_N2/JMES-2023-14013-Ano.pdf
- Arana Juve, J. M., Christensen, F. M. S., Wang, Y. y Wei, Z. (2022). Electrodialysis for metal removal and recovery: A review. *Chemical Engineering Journal*, 435, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.134857>
- Azimi, A., Azari, A., Rezakazemi, M. y Ansarpour, M. (2017). Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewaters: A Review. *ChemBioEng Reviews*, 4(1), 37-59. <https://doi.org/10.1002/cben.201600010>
- Barakat, M. A. (2011). New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*, 4, 361-377. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.07.019>
- Carolin, C. F., Kumar, P. S., Saravanan, A., Joshiba, G. J. y Naushad, M. (2017). Efficient techniques for the removal of toxic heavy metals from aquatic environment: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(3), 2782-2799. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.05.029>
- Ciszewski, M., Drzazga, M., Kowalik, P., Orda, S. y Hawełek, Ł. (2022). Lead electrodeposition from aliphatic polyamines solutions. *SN Applied Sciences*, 4(4). <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05020-0>
- Diario Oficial de la Federación (2000). NOM-127-SSA1-1994: Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a los que debe someterse el agua para su potabilización. *Diario Oficial de la Federación*, 73178. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4866379&fecha=18/01/1996

- Diario Oficial de la Federación (2014). NOM-002-SEMARNAT-1996: Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. *Diario Oficial de la Federación*, 1-66. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4881304&fecha=03/06/1998#gsc.tab=0
- Driscoll, C. T., Mason, R. P., Chan, H. M., Jacob, D. J. y Pirrone, N. (2013). Mercury as a global pollutant: Sources, Pathways, and Effects. *Environmental Science and Technology*, 47(10), 4967-4983. <https://doi.org/10.1021/es305071v>
- Haider, F. U., Liqun, C., Coulter, J. A., Cheema, S. A., Wu, J., Zhang, R., Wenjun, M. y Farooq, M. (2021). Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111887>
- Higgs, J. M., Bingham, B. R. y Boyer, R. (2022). Alternating Current for the Selective Electrodeposition of Cadmium, Iron, and Chromium Method Development for Simulated Industrial Wastewater Sludge. *International Journal of Water and Wastewater Treatment*, 8(1), 1-5. <https://doi.org/10.16966/2381-5299.182>
- Holt, P. K., Barton, G. W., Wark, M. y Mitchell, C. A. (2002). A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation. *Colloids and Surfaces*, 211, 233-248. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(02\)00285-6](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(02)00285-6)
- Hu, J., Chen, C., Zhu, X. y Wang, X. (2009). Removal of chromium from aqueous solution by using oxidized multiwalled carbon nanotubes. *Journal of Hazardous Materials*, 162(2-3), 1542-1550. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.058>
- Khattab, I. A., Shaffei, M. F., Shaaban, N. A., Hussein, H. S. y Abd El-Rehim, S. S. (2013). Electrochemical removal of copper ions from dilute solutions using packed bed electrode. Part II. *Egyptian Journal of Petroleum*, 22(1), 205-210. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2012.09.012>
- Kim, J., Yoon, S., Choi, M., Min, K. J., Park, K. Y., Chon, K. y Bae, S. (2022). Metal ion recovery from electrodialysis-concentrated plating wastewater via pilot-scale sequential electrowinning/chemical precipitation. *Journal of Cleaner Production*, 330, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129879>
- Kong, Y., Wei, J., Wang, Z., Sun, T., Yao, C. y Chen, Z. (2011). Heavy metals removal from solution by polyaniline/palygorskite composite. *Journal of Applied Polymer Science*, 122(3), 2054-2059. <https://doi.org/10.1002/app.34195>
- Kuleyin, A. y Uysal, H. E. (2020). Recovery of copper ions from industrial wastewater by electrodeposition. *International Journal of Electrochemical Science*, 15(2), 1474-1485. <https://doi.org/10.20964/2020.02.39>
- Kurniawan, T. A., Chan, G. Y. S., Lo, W. H. y Babel, S. (2006). Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chemical Engineering Journal*, 118(1-2), 83-98. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.01.015>

- Maarof, H. I., Daud, W. M. A. W. y Aroua, M. K. D. (2017). Recent trends in removal and recovery of heavy metals from wastewater by electrochemical technologies. *Reviews in Chemical Engineering*, 33, 359-386. <https://doi.org/10.1515/revce-2016-0021>
- Merzouk, B., Gourich, B., Sekki, A., Madani, K. y Chibane, M. (2009). Removal turbidity and separation of heavy metals using electrocoagulation-electroflotation technique. A case study. *Journal of Hazardous Materials*, 164(1), 215-222. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.144>
- Meunier, N., Drogui, P., Montané, C., Hausler, R., Mercier, G. y Blais, J. F. (2006). Comparison between electrocoagulation and chemical precipitation for metals removal from acidic soil leachate. *Journal of Hazardous Materials*, 137(1), 581-590. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.050>
- Özverdi, A. y Erdem, M. (2006). Cu²⁺, Cd²⁺ and Pb²⁺ adsorption from aqueous solutions by pyrite and synthetic iron sulphide. *Journal of Hazardous Materials*, 137, 626-632. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.051>
- Prieto-García, F., Callejas-Hernández, J., Reyes-Cruz, V. E., Marmolejo-Santillán, Y. y Prieto-Méndez, J. (2014). Electrodisolution aluminum electrode during an electrocoagulation acid whey. *DYNA (Colombia)*, 81(187), 129-136. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n187.40757>
- Qasem, N. A. A., Mohammed, R. H. y Lawal, D. U. (2021). Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review. *Clean Water*, 4(1), 1-15. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>
- Sadegh Safarzadeh, M., Bafghi, M. S., Moradkhani, D. y Ojaghi Ilkhchi, M. (2007). A review on hydrometallurgical extraction and recovery of cadmium from various resources. *Minerals Engineering*, 20(3), 211-220. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2006.07.001>
- Sandstead, H. (1975). Some trace elements which are essential for human nutrition. *Progress in Food and Nutrition Science*, 1, 371-391.
- Scarazzato, T., Panossian, Z., Tenório, J. A. S., Pérez-Herranz, V. y Espinosa, D. C. R. (2017). A review of cleaner production in electroplating industries using electrodialysis. *Journal of Cleaner Production*, 168, 1590-1602. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.152>
- Scott, W. W. (2001). *ASM Specialty Handbook® Copper and Copper Alloys* (Davis & Associates [ed.]; 1st ed.). ASM International. <http://www.asminternational.org>
- Shrestha, R., Ban, S., Devkota, S., Sharma, S., Joshi, R., Tiwari, A. P., Kim, H. Y. y Joshi, M. K. (2021). Technological trends in heavy metals removal from industrial wastewater: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 2213-3437. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105688>
- Solomons, N. W. (1985). Biochemical, Metabolic, and Clinical Role of Copper in Human Nutrition. *Journal of the American College of Nutrition*, 4(1), 83-105. <https://doi.org/10.1080/07315724.1985.10720069>

- Vargas, A. R., Guillén, C. S., Magaña Haynes, M. E. y AlJaberi, F. Y. (2023). Nickel removal from an industrial effluent by electrocoagulation in semi-continuous operation: Hydrodynamic, kinetic and cost analysis. *Results in Engineering*, 17, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100961>
- Vasudevan, S. y Lakshmi, J. (2011). Effect of alternating and direct current in an electrocoagulation process on the removal of cadmium from water. *Separation and Purification Technology*, 80, 643-651. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.859>
- Yi, Y., Feng, H., Wang, J., Tang, J., Wu, Y., Liang, X., Guo, Y. y Tang, L. (2022). Simultaneous Recovery of NH₃-N and Removal of Heavy Metals from Manganese Residue Leachate Using an Electrodialysis System. *ACS ES and T Water*, 3, 793-803. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.2c00580>
- Yu, B., Zhang, Y., Shukla, A., Shukla, S. S., & Dorris, K. L. (2000). The removal of heavy metal from aqueous solutions by sawdust adsorption-removal of copper. *Journal of Hazardous Materials*, 80. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(00\)00278-8](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00278-8)
- Zamora-Ledezma, C., Negrete-Bolagay, D., Figueroa, F., Zamora-Ledezma, E., Ni, M., Alexis, F. y Guerrero, V. H. (2021). Heavy metal water pollution: A fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods. *Environmental Technology and Innovation*, 22, 101504. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101504>
- Zhu, Y., Fan, W., Zhou, T. y Li, X. (2019). Removal of chelated heavy metals from aqueous solution: A review of current methods and mechanisms. *Science of the Total Environment*, 678, 253-266. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.416>