DEPURACIÓN DE TRATAMIENTO DE AFLUENTE CON ALTO CONTENIDO DE METALES PESADOS QUE AFECTE A LAS ESTRUCTURAS METÁLICAS

TREATMENT PURIFICATION OF AFFLUENT WITH A HIGH CONTENT OF HEAVY METALS THAT AFFECTS METALLIC STRUCTURES

Fernando Michael Cobeña Macías[1]

[1]Universidad Estatal del Sur de Manabí. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1959-8095. Correo: fernando.cobena@unesum.edu.ec

María Lorena Ponce Vince[2]

[2]Universidad Estatal del Sur de Manabí. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4302-5713. Correo: maria.ponce@unesum.edu.ec

Christian German Gallegos Campos[3]

[3]Universidad Estatal del Sur de Manabí Universidad Estatal del Sur de Manabí. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3487-0335. Correo: christian.gallegos@unesum.edu.ec

Franklin Rodolfo Quiroz García[4]
[4]Investigador privado. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-9220-6828. Correo: franklinquirozgarcia@gmail.com

*** Autor para correspondencia:** fernando.cobena@unesum.edu.ec

Resumen

La presente investigación realiza una Revisión Sistemática de la Literatura científica para analizar los métodos de depuración de tratamiento de afluente con alto contenido de metales pesados que afecte a las estructuras metálicas, reportados en la literatura científica. Se recuperaron inicialmente un total de 805 estudios obtenidos de las bases de datos Scopus, IEEE, Web of Science, Scielo, Elsevier, Springer; con los buscadores Google Scholar, Semantic Scholar e IEEE Xplore; finalmente se incluyeron 16 en esta investigación. Como resultado fundamental, se identificaron 12 métodos de depuración de afluente contaminado con metales pesados. Para la presente investigación fueron especialmente significativos los métodos los métodos de tratamiento convencionales, para países en desarrollo. Los resultados obtenidos en varias investigaciones indican que las

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).
Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

estructuras metálicas se ven afectadas cuando están en contacto con afluentes con alto contenido de metales pesados, fundamentalmente cuando el afluente está relacionado con aguas industriales.

Palabras clave: depuración; afluente; estructuras metálicas; metales pesados.

Abstract

The present investigation carries out a Systematic Review of the scientific Literature to analyze the purification methods of treatment of affluent with a high content of heavy metals that affects metallic structures, reported in the scientific literature. A total of 805 studies obtained from the Scopus, IEEE, Web of Science, Scielo, Elsevier, Springer databases were initially retrieved; with the Google Scholar, Semantic Scholar and IEEE Xplore search engines; Finally, 16 were included in this investigation. As a fundamental result, 12 methods of purification of affluent contaminated with heavy metals were identified. For the present investigation, the conventional treatment methods for developing countries were especially significant. The results obtained in several investigations indicate that metallic structures are affected when they are in contact with tributaries with a high content of heavy metals, mainly when the tributary is related to industrial waters.

Keywords: *depuration; tributary; metallic structures; heavy metals.*

Fecha de recibido: 25/04/2023
Fecha de aceptado: 15/07/2023
Fecha de publicado: 22/07/2023

Introducción

Los avances industriales se han asociado con un aumento en la introducción de contaminantes en el medio ambiente. Entre estos, se destaca la contaminación del agua por metales. Los afluentes contaminados con metales pesados (HM, *Heavy metals*) se han vuelto comunes en todo el mundo debido al aumento de las actividades geológicas y antropogénicas (Chibuike & Obiora, 2014). Aunque los metales pesados están naturalmente presentes en el suelo, las actividades geológicas y antropogénicas aumentan la concentración de estos elementos en cantidades que son dañinas cuando contaminan los afluentes. Algunas de estas actividades incluyen la extracción y fundición de metales; la quema de combustibles fósiles; el uso de fertilizantes y pesticidas en la agricultura; la producción de baterías y otros productos metálicos en las industrias; los lodos de depuradora; y la eliminación de desechos municipales que producen lixiviados (Cornelio & Marzo, 2021).

Los HM provienen de una variedad de fuentes; pueden ser naturales debido a la meteorización y la erosión o el resultado de agentes antropogénicos. Eventos naturales como la deposición atmosférica y las erupciones volcánicas han contribuido a la contaminación por HM. Dada la intensa actividad humana que caracteriza al mundo industrial moderno, las fuentes naturales de HM que resultan de la lixiviación y la meteorización de las rocas en el medio ambiente suelen ser motivo preocupación (Paul, 2017).

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).
Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

A pesar de las reglamentaciones aprobadas y la legislación actualizada, los iones metálicos generalmente se descargan como contaminantes tóxicos en los afluentes por diversas operaciones metalúrgicas, mineras de carbón, químicas, electrolíticas y farmacéuticas. Asimismo, las industrias metalúrgicas, pinturas, pigmentos, recubrimientos, fertilizantes y pesticidas que contienen HM, combustión de petróleo, centrales eléctricas de carbón, electrónica, microelectrónica, galvanización, baterías, farmacéutica, química, plásticos, industrias de tejidos y galvanoplastia, refinerías, fábricas de papel, industrias nucleares las centrales eléctricas y las líneas de alta tensión también son fuentes de contaminación de HM (Elbasiouny et al., 2021).

Los afluentes pueden incluir HM no biodegradables como níquel (Ni), cobre (Cu), cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), arsénico (As), mercurio (Hg) y zinc (Zn) que en altas concentraciones pueden ser muy perjudiciales. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha compilado una lista de las principales sustancias químicas preocupantes, que incluye muchos HM: arsénico, asbesto, benceno, cadmio, dioxina, fluoruro, plomo y mercurio. El arsénico, el cadmio, el plomo y el mercurio generalmente se consideran HM (Men et al., 2021).

Existen varios métodos para remediar los afluentes contaminados con metales pesados; van desde métodos físicos y químicos hasta métodos biológicos. La mayoría de los métodos físicos y químicos (como la encapsulación, la solidificación, la estabilización, la electrocinética, la vitrificación, y la extracción de vapor) son costosos y dejan trazas de contaminación. Los métodos de tratamiento convencionales tienen desventajas; sin embargo, la adsorción en biomasa es un método muy prometedor con alta eficiencia y bajo costo que evita muchas de las desventajas de los métodos convencionales (Elbehiry et al., 2020).

El contenido excesivo de metales pesados en los afluentes podría provocar afectaciones considerables en las estructuras metálicas en contacto. Hay muchos factores que influyen en el proceso corrosión de las estructuras metálicas cercanas a los afluentes con alto contenido de metales pesados, por ejemplo: factores de calidad del agua de pH, oxígeno disuelto (OD), fosfato, cloruro, sulfato, desinfectante y condiciones hidráulicas como caudal. Mientras tanto, la catálisis de metales, la coordinación, la adsorción competitiva, la coprecipitación y otras interacciones también pueden existir entre las estructuras metálicas y el afluente, contaminados con metales pesados en el suelo o los minerales.

La investigación sobre la migración y liberación de metales pesados en afluentes se realiza principalmente a través de experimentos por lotes o dispositivos simples de red de tuberías. Las condiciones experimentales y de operación varían, especialmente las condiciones de corrosión severa y retención que sufren las estructuras metálicas comprometidas.

Los microorganismos tienden a colonizar superficies sólidas en un entorno natural. El biofilm forma una capa protectora, reduciendo la exposición de la superficie sólida al ambiente externo. Sin embargo, también podría provocar corrosión localizada que aumenta al entrar en contacto con metales pesados contenidos en afluentes, por lo que ocurre el deterioro de los materiales del sustrato, como polímeros, hormigón y metales. La presente investigación estará enfocada en estos últimos, siendo el objetivo: identificar los métodos de depuración de tratamiento de afluente con alto contenido de metales pesados que afecte a las estructuras metálicas.

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

Materiales y métodos

El objetivo de la presente investigación es realizar una Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) sobre los métodos de depuración de tratamiento de afluente con alto contenido de metales pesados que afecte a las estructuras metálicas. Se pretende recopilar información relevante en esta área; identificar los métodos y tecnologías de depuración actuales; recuperar los estudios relevantes en esta área; a la vez que se identifican áreas de investigación futura y, con un análisis crítico asertivo. Se responderá a la siguiente pregunta de investigación:

P 1: ¿Cuáles son los métodos de depuración de tratamiento de afluente con alto contenido de metales pesados que afecte a las estructuras metálicas?

Estrategia de la RSL

Se realizó una revisión sistemática automática usando sobre las bases de datos Scopus, IEEE, Web of Science, Scielo, Elsevier, Springer; con los buscadores Google Scholar, Semantic Scholar e IEEE Xplore. También se realizó una búsqueda manual en revistas de alto impacto para el objeto de estudio como:

- *Watershed Ecology and the Environment.*
- *Frontiers in Sustainability.*
- *Water Research*
- *Hindawi Publishing Corporation Applied and Environmental Soil Science*

Asimismo, se realizó la búsqueda manual de artículos citados en las secciones de referencia de los artículos, para identificar artículos de investigación que hayan la depuración de afluentes y las consecuencias en estructuras metálicas. Se consideraron como artículos muy relevantes para esta investigación, aquellos que realizan análisis experimentales y estadísticos.

Se utilizaron los siguientes términos de búsqueda durante la recuperación de información: *"wastewater"; "heavy metal"; "adsorbents,"; "biocorrosion"; "Steel Structures"; "sewage effluent"*; "sewage treatment"; haciendo uso de los operadores booleanos AND y OR.

Criterios de inclusión

Para que un estudio sea incluido en la revisión, los metales pesados debían ser la principal variable independiente del estudio. También se incluyeron estudios que analizaron técnicas de depuración de efluentes, aunque no realizaron análisis para comprobar su hipótesis. En estos casos se incluyeron otros estudios que sí aplicaron experimentos de depuración y registraron los resultados. De manera general se incluyeron los estudios que cumplen con los siguientes criterios:

- Se incluyeron artículos de investigación publicados en revistas revisadas por pares desde 2018 hasta 2023.
- También se incluyeron trabajos fuera de los últimos 5 años si la información provista no tiene un límite de tiempo.
- Artículos de investigación, artículos originales, capítulos de libros, conferencias y artículos de revisión.

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

- Se incluyeron recursos de las bases de datos Scopus, IEEE, Web of Science, Scielo, Elsevier, Springer.

Criterio de exclusión

Se excluyeron los artículos si cumplían con alguno de los siguientes criterios:

- El estudio se realizó en un idioma que no era inglés o español.
- Los estudios no fueron revisados por pares.

Para el proceso de recuperación y selección se ejecutaron las siguientes actividades:

1. Los recursos repetidos que aparecen en varias bases de datos se eliminaron durante una primera etapa de selección. Los recursos no retirados en esta etapa fueron puestos en acta.
2. Se realizó una lectura completa del resumen/introducción y una inspección de los recursos. La principal exclusión en esta etapa se debe a los estudios que no están relacionados con los metales pesados y su afectación a estructuras metálicas. Este proceso fue realizado por todos los autores de forma independiente antes de presentar un registro de inclusiones y exclusiones provisionales. La lista de exclusiones acordadas por unanimidad no fueron entonces consideradas para esta revisión.
3. En la lista de inclusión provisional se realizó la lectura de texto completo y se preparó una lista de inclusión final.
4. Los estudios identificados para estar en la lista de inclusión final se examinaron con el fin de identificar las tendencias y tecnologías de depuración de tratamiento de afluente con alto contenido de metales pesados que afecte a las estructuras metálicas.

Los resultados en el proceso de selección de estudios se muestran en la Figura 1. Los 16 estudios seleccionados, se tomaron como sustento para el análisis e interpretación de datos, para responder a las preguntas de la investigación.

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

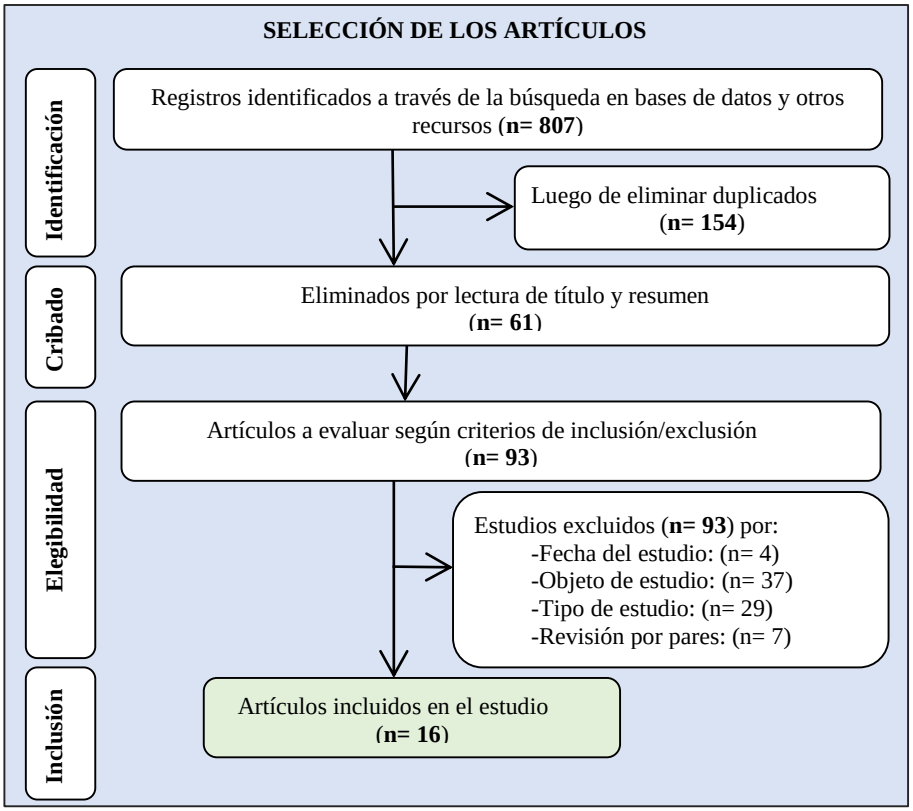

Figura 1. Selección de los estudios primarios incluidos en la investigación.

Resultados y discusión

El listado de estudios primarios incluidos en la presente investigación sobre los métodos de depuración de tratamiento de afluente con alto contenido de metales pesados que afecte a las estructuras metálicas, se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Artículos científicos incluidos en la investigación.

ID	Tema	Referencia
1	Study on the occurrence of typical heavy metals in drinking water and corrosion scales in a large community in northern China.	(S. Zhang et al., 2022)
2	Anthropogenic Impact of the Environmental Pollution with Heavy Metals on the Corrosion Protection of Metal Structures.	(Tsibulya et al., 2022)
3	Effects of toxic metals and chemicals on biofilm and biocorrosion.	(Fang et al., 2002)
4	Development of investigations in the field of corrosion and stress-corrosion fracture of metals and the methods of their protection (A survey)	(Pokhmurs' kyi, 2019)

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

5	Effect of radioactive contamination of the medium on the durability of steel 20	(Tsybulya et al., 2017)
6	Nanomaterials for the treatment of heavy metal contaminated water	(Baby et al., 2022)
7	Iron oxide nanoparticles: applicability for heavy metal removal from contaminated water	(Al-Saad et al., 2012)
8	The ability of Azolla caroliniana to remove heavy metals (Hg (II), Cr (III), Cr (VI)) from municipal waste water	(Bennicelli et al., 2004)
9	Ecofriendly remediation technologies for wastewater contaminated with heavy metals with special focus on using water hyacinth and black tea wastes: a review	(Elbasiouny et al., 2021)
10	MIL series of metal organic frameworks (MOFs) as novel adsorbents for heavy metals in water: A review	(H. Zhang et al., 2022)
11	Aqueous adsorption of heavy metals on metal sulfide nanomaterials: Synthesis and application	(Kromah & Zhang, 2021)
12	Potential toxic metal accumulation in soil, forage and blood plasma of buffaloes sampled from Jhang, Pakistan	(Khan et al., 2018)
13	Effectiveness of a new green technology for metal removal from contaminated water	(Grenni et al., 2019)
14	Practical Cases Of The Use Of Molecular Techniques To Characterize Microbial Deterioration Of Metallic Structures In Industry	(Le Borgne et al., 2007)
15	Environmental deterioration of metals	(Novák, 2007)
16	Role of air pollutant for deterioration of Taj Mahal by identifying corrosion products on surface of metals	(Singh et al., 2022)

Métodos y tecnologías de depuración de afluente con alto contenido de metales pesados

Uno de los objetivos más importantes de la remediación es reducir la biodisponibilidad de los metales pesados (HM) y, por lo tanto, su acumulación y toxicidad. El tratamiento de afluentes contaminados con metales pesados es un desafío. Los HM son no degradables, persistentes en el medio ambiente, tienen una alta capacidad de dispersión por el agua, pueden bioacumularse y representan riesgos para la salud humana, ambiental, y la integridad de estructuras metálicas (Elbasiouny et al., 2021).

Entre las tecnologías de remediación, la adsorción con nanomateriales de sulfuro de metal ha demostrado ser una estrategia prometedora debido a sus propiedades rentables, respetuosas con el medio ambiente, de modulación de la superficie y manejables. Sus características de adsorción se atribuyen a los átomos de azufre inherentemente expuestos que interactúan con los metales pesados a través de varios procesos (Kromah & Zhang, 2021). En la Tabla 2 se muestran los métodos propuestos por algunos investigadores:

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

Tabla 2. Depuración de afluente contaminado con metales pesados.

Título	Método/tecnología de depuración	Referencias
Aqueous adsorption of heavy metals on metal sulfide nanomaterials: Synthesis and application	Nanoadsorbentes de sulfuro metálico	(Kromah & Zhang, 2021)
Ecofriendly remediation technologies for wastewater contaminated with heavy metals with special focus on using water hyacinth and black tea wastes: a review.	Adsorción en biomasa	(Elbasiouny et al., 2021)
Phytoremediation of heavy metals and its mechanism: A brief review	Microorganismos como células microbianas	(Gupta & Balomajumder, 2015)
Perspectives of phytoremediation using water hyacinth for removal of heavy metals, organic and inorganic pollutants in wastewater	Fitorremediación	(Rezania et al., 2015)
Nanomaterials for the treatment of heavy metal contaminated water	Nanotecnología	(Baby et al., 2022)
Advancements in the use of filtration materials for the removal of heavy metals from multicontaminated solutions	Filtración	(Calabrò et al., 2021)
Removal of heavy metal ions from water and wastewaters by sulfur-containing precipitation agents.	Precipitación	(Pohl, 2020)
The detoxification of heavy metals from aqueous environment using nano-photocatalysis approach: a review	Fotocatálisis	(Tahir et al., 2019)
Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability	Extracción	(Liu et al., 2018)
Chemical coagulation process for the removal of heavy metals from water: a review	Coagulación	(Tang et al., 2016)
Electrochemical treatment of wastewater: Selectivity of the heavy metals removal process	Tratamiento Electroquímico	(Tran et al., 2017)
Removal of heavy metals from industrial wastewaters: a review	Proceso Físico-Químico (precipitación química e intercambio iónico)	(Azimi et al., 2017)

Las investigaciones consultadas refieren que la mayoría de los nuevos sulfuros metálicos (MS) y sus nanocompuestos (NC) tienen la ventaja de estar compuestos por metales de transición con afinidades sobresalientes por muchos HM. Los sulfuros de metales de transición (TMS) contienen numerosas vacantes superficiales, defectos y sitios reactivos, como sitios de bordes metálicos, sitios de bordes S y sitios del plano basal en sus estructuras. Estas imperfecciones permiten la presencia de abundantes sitios activos de adsorción para los mecanismos de eliminación, incluido el intercambio iónico directo, la reacción redox, la precipitación, la complejación de la superficie y la atracción electrostática de los cationes HM que son capaces de atravesar y poblar estas interfaces (Kromah & Zhang, 2021).

Los microorganismos han sido utilizados por Gupta y Balomajumder como biosorbentes para eliminar HM y compuestos orgánicos de los afluentes. Tanto las células microbianas vivas como las muertas se utilizan para transformar o adsorber HM y sus productos y pueden ser un bioacumulador altamente eficiente ((Gupta & Balomajumder, 2015).

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

En un estudio realizado por Rezania y colaboradores, se presenta la fitorremediación como un método posible para eliminar los contaminantes de los afluentes y se conoce como una tecnología de remediación verde. Hoy, el objetivo es buscar un enfoque sostenible en el desarrollo de la capacidad de depuración de las sustancias acuosas (Rezania et al., 2015).

El tratamiento electroquímico de aguas para la eliminación de metales pesados es uno de los métodos más eficientes y compactos. Sin embargo, desde una perspectiva económica, el método es muy costoso debido a que requiere grandes cantidades de electricidad. Para el tratamiento de algunos efluentes industriales, como los contaminantes en un refectorio, este proceso es fundamental. Los tratamientos electroquímicos se clasifican básicamente en tres categorías: electrocoagulación, electrodeposición y electroflotación.

La precipitación química es el método es el más utilizado para el tratamiento de aguas, ya que el proceso es muy sencillo y fácil de instalar en cualquier lugar. Este método requiere una gran cantidad de productos químicos para reducir el ion metálico en forma de precipitación. Sin embargo, como el proceso utiliza una gran cantidad de productos químicos para la reducción, los productos químicos utilizados pueden convertirse en otra fuente de contaminantes.

El intercambio iónico se define como un proceso de intercambio iónico reversible entre las fases sólida y líquida. El proceso comienza con la reacción de intercambio iónico de tamaño similar, seguida de la absorción físico-química de los iones de metales pesados por los diversos grupos funcionales presentes en las columnas de intercambio iónico. Finalmente, la hidratación tiene lugar en la superficie de los poros del absorbente. El proceso depende de varios parámetros como el pH, la temperatura, los iones y el tiempo de concentración del absorbente y del adsorbente. En este proceso, se utiliza resina que absorbe tipos similares de iones de metales pesados de la solución de aguas residuales a través del proceso de intercambio iónico.

La absorción también es un método bien conocido que se utiliza para reducir la concentración de metales pesados en los afluentes. El principio básico de este método es que la masa se intercambia entre las fases líquida y sólida. La absorción de metales pesados desde la solución de aguas residuales al absorbente se realiza a través de tres etapas:

1. Difusión de iones de metales pesados desde la mayor parte de la solución de aguas residuales a la superficie de absorción;
2. Absorción de metales pesados con otros contaminantes en la superficie del absorbente;
3. Infiltración de metales pesados en la estructura absorbente

El proceso fotocatalítico es una nueva tecnología para purificar el agua de varios contaminantes. La investigación basada en esta tecnología para el tratamiento de aguas residuales está ahora en pleno desarrollo. Esta técnica utiliza material semiconductor con una longitud de onda de luz específica para el tratamiento de contaminantes presentes en las aguas residuales. Este ha sido un proceso atractivo, ya que la técnica no utilizó otros productos químicos para tratar los contaminantes. La principal ventaja de este proceso es que tiene un diseño simple, un método económico y una alta eficiencia en la remoción de contaminantes. Además de los tratamientos con metales pesados, el proceso se ha aplicado para muchos propósitos, como la desinfección de microorganismos, la degradación de compuestos orgánicos y la fabricación de combustibles químicos.

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

Afectación de las estructuras metálicas

De acuerdo con la investigación realizada, la mayor afectación que sufren las estructuras metálicas es la corrosión. La corrosión de los metales ha sido entendida como una interacción fisicoquímica entre un metal y su entorno que provoca cambios en las propiedades del metal y que puede provocar un deterioro significativo de la función del metal, del medio ambiente o del sistema técnico del que forman parte (Klett et al., 2021).

El ambiente corrosivo contiene sustancias que, al entrar en contacto con un metal determinado, provocan corrosión. Además de la composición química del medio ambiente, la temperatura y el caudal influyen significativamente en la corrosión. La composición química se caracteriza tanto por la presencia de ciertos componentes (o su combinación) como por la concentración de componentes individuales. La resistencia a la corrosión se ve afectada de manera más significativa por el pH ambiental y por la presencia de sustancias que tienen un efecto de oxidación.

En la mayoría de los casos de corrosión de metales en electrolitos, es decir, los ambientes donde los componentes se disocian en iones, el principal mecanismo de degradación es el electroquímico, es decir, la disolución anódica. Pero la corrosión no electroquímica de los metales, como la corrosión en gases a temperaturas más altas, y el daño por hidrógeno también son reacciones químicas inherentes a sus mecanismos.

El área de inmunidad al cobre interfiere con el área de estabilidad del agua solo en parte; la resistencia a la corrosión normalmente se basa en la estabilidad de los óxidos de cobre. El aumento de la capacidad oxidante en un ambiente ácido es muy indeseable para el cobre; el cobre no resiste principalmente en ácidos oxidantes. El cromo es un metal no noble con un área de inmunidad que se encuentra en lo profundo de la región de valores de potencial negativos. Similar al hierro, la estabilidad de sus óxidos e hidróxidos y la posibilidad de pasivación son aprovechables. El zinc y el aluminio son metales anfóteros y, por lo tanto, solubles tanto en ambientes ácidos como alcalinos. La pasividad puede alcanzarse solo por el cambio de pH, no por el cambio de la capacidad oxidante. El titanio y el tantalio son metales muy poco nobles, pero gracias a sus óxidos muy estables, son pasivos casi en toda el área de estabilidad del agua.

En el estudio realizado por (S. Zhang et al., 2022) se determinaron el contenido y los patrones de distribución de los metales pesados típicos (Cr, Cd, Mn, Pb, V) y un metaloide de As, que se encuentran ampliamente en afluentes a nivel mundial y que causan problemas de salud después de una liberación excesiva. Se utilizaron incrustaciones de corrosión de la tubería para el experimento por lotes. Se estudiaron las características de liberación estática de los seis metales pesados y se compararon con la investigación de campo. Los resultados reflejaron que estos metales pesados afectan las estructuras metálicas a partir de incrustaciones de corrosión en polvo; siendo el Mn el de mayor incidencia.

La investigación de (Fang et al., 2002) analizó los microbios en las biopelículas marinas que aumentaron la producción de Sustancias Poliméricas Extracelulares (EPS), en más del 100 % en algunos casos, cuando los medios de agua de mar contenían metales y sustancias químicas tóxicas, como Cd(II), Cu(II), Pb (II), Zn(II), Al(III), Cr(III), glutaraldehído y fenol. La formación de grupos microbianos y el aumento de la producción de EPS, que contenía proteínas y polisacáridos, aceleró la corrosión del acero dulce. Sin embargo, no hubo

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

una relación cuantitativa entre el grado de aumento de la corrosión y la toxicidad de las estructuras metálicas, con base en el sulfato.

Los investigadores (Tsibulya et al., 2022) estudiaron las características específicas de protección contra la corrosión de las estructuras metálicas que sufren el impacto antropogénico. El estudio demostró que la contaminación del agua dulce, agua de mar, aire y suelo con metales pesados aumenta el riesgo de accidentes antropogénicos. Se propuso un procedimiento que permitió establecer las dependencias de correlación de los parámetros integrales de contaminación antropogénica sobre la resistencia a la corrosión del acero y determinamos niveles seguros de la influencia antropogénica sobre la vida útil de las estructuras metálicas. Se demostró además, la posibilidad de mejorar el nivel de protección contra la corrosión con la ayuda de composiciones protectoras sinérgicas ambientalmente seguras eficientes basadas en el uso de materias primas secundarias con la utilización de los desechos regionales, y con la reducción simultánea del grado de contaminación antropogénica del medio ambiente.

El autor (Pokhmurs' kyi, 2019) analizó aspectos de los problemas de corrosión y fractura por corrosión bajo tensión de las estructuras metálicas. Se describen las principales regularidades y mecanismos de agrietamiento por corrosión, fatiga por corrosión y corrosión por fricción de metales dependiendo de su estructura y condiciones de interacción con afluentes con alto contenido de metales pesados. Además, realiza pruebas de protección inhibidora de metales y el desarrollo de recubrimientos protectores metálicos y no metálicos.

En la investigación realizada por (Tsybulya et al., 2017) se analiza el efecto que la radiación ionizante provocada por la contaminación radiactiva que se ejerce sobre la superficie de muestras de acero al carbono 20, sobre su resistencia a la corrosión y sobre la confiabilidad de operación según ensayos de fatiga de bajo ciclo. Como resultado de la corrosión y el daño mecánico de las estructuras metálicas de pared delgada, en particular, de las tuberías. Se demostró que incluso niveles bajos de actividad contaminante, causaron pérdida por corrosión del metal y una disminución en la confiabilidad de la operación. Mediante simulación por computadora se desarrollaron compuestos protectores sinérgicos que suprimen los efectos destructivos de la radiación y aseguran el funcionamiento confiable de las estructuras metálicas debido a la quelación de los átomos metálicos superficiales.

Discusiones

Los estudios recuperados indican que las estructuras metálicas se ven afectadas cuando están en contacto con afluentes con alto contenido de metales pesados, fundamentalmente cuando el afluente está relacionado con aguas industriales. La agresividad de los afluentes industriales está influido por modificaciones intencionadas o por las sustancias que se introducen en el agua durante su uso o que se concentran durante su circulación.

La estructura de metal expuesta a un afluente absolutamente puro se corroe solo de forma irrelevante. Sin embargo, el contenido de oxígeno disuelto en agua pura que está en contacto con una atmósfera libre a temperatura ambiente (hasta 10 mg O2/l) no es suficiente para la pasivación del acero al carbono. Las aguas naturales e industriales tienen un pH que suele oscilar entre 3 y 9 y, por lo tanto, en la mayoría de los metales se forma una capa de productos de corrosión insolubles. La calidad de esta capa a menudo determina la resistencia a la corrosión. Principalmente agentes adicionales, una cierta cantidad de los cuales están siempre presentes tanto en aguas naturales como industriales, son responsables del proceso de reacciones de corrosión en el agua.

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

Las tecnologías de tratamiento para eliminar los HM de las soluciones acuosas incluyen la biorremediación, la precipitación química, la electrocoagulación, las resinas de intercambio iónico, la separación por membrana, la adsorción, la reducción, la evaporación, la ósmosis inversa, la coagulación, la floculación y la extracción con solventes. Cada uno de estos métodos tiene sus ventajas y desventajas; sin embargo, la mayoría de ellos son costosos, ineficientes cuando existe la necesidad de remover HM de grandes cantidades de agua y tienen limitaciones como el alto consumo de energía, la no selectividad y el uso de productos químicos con la correspondiente necesidad de una adecuada disposición de los mismos (Baby et al., 2022).

Para los países en desarrollo, la opción más viable es la depuración por métodos de tratamiento convencionales (Sánchez & Barrezueta, 2023). Se han aplicado diversos materiales para la eliminación de estos contaminantes del agua, por ejemplo mediante biosorbentes de residuos agrícolas, materiales a base de carbono, como carbón, carbón activado, grafeno, óxido de grafeno, nanotubos de carbono de pared simple, nanotubos de carbono, fullerenos y diversos materiales poliméricos. Además de esto, los nanomateriales que no son de carbono también se usan ampliamente en la purificación del agua y la remediación ambiental, a saber, nanopartículas de magnetita de óxido de hierro, hidróxidos dobles en capas (LDH), óxidos metálicos (MO), estructuras metal-orgánicas (MOF).

Se ha observado que la nanotecnología tiene más interés en el campo de la aplicación ambiental debido a su área de superficie más alta y sus propiedades fisicoquímicas ajustables. Los semiconductores de óxido metálico, como el óxido de titanio y el óxido de zinc, son capaces de generar eficazmente para eliminar la contaminación del agua por metales pesados. Otra clase de nanomateriales sin carbono es la arcilla. La arcilla sintética se puede preparar fácilmente utilizando el método de coprecipitación de abajo hacia arriba y se pueden decorar con óxidos de titanio y óxido de zinc. Los materiales resultantes se pueden utilizar para la purificación de agua contaminada con metales pesados.

Entre las diversas tecnologías de eliminación de HM, la adsorción se considera la más prometedora debido a su alta eficiencia, facilidad de uso, diseño simple y bajo costo. La adsorción se conoce como una tecnología moderna confiable y preferida por muchas industrias. Se ha informado que materiales como el carbón activado, la turba, las cenizas volantes, las cenizas de lodos de depuradora, las zeolitas, la biomasa leñosa y otros biomateriales tienen una gran capacidad para eliminar ciertos metales como el plomo y el cadmio de las aguas residuales.

Conclusiones

El costo de las acciones de remediación es una fuente de preocupación. La eliminación de metales pesados de los afluentes, con materiales de bajo costo es prometedora en la práctica. Muchos estudios han demostrado el uso de materiales de bajo costo y plantas acuáticas para la eliminación de HM en los afluentes. Debido a sus propiedades fisicoquímicas, los nanomateriales, incluidos los nanosorbentes y las nanomembranas, son atractivos para una amplia variedad de usos en muchos campos, incluido el tratamiento de afluentes. Estos métodos prometedores de biorremediación tienen muchas ventajas, como sorción eficiente y bajo costo, y bajo consumo de energía que pueden permitir lograr un tratamiento sostenible.

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

Referencias

Al-Saad, K., Amr, M., Hadi, D., Arar, R., Al-Sulaiti, M., Abdulmalik, T., Alsahamary, N., & Kwak, J. (2012). Iron oxide nanoparticles: applicability for heavy metal removal from contaminated water. *Arab Journal of Nuclear Sciences and Applications*, *45*(2), 335-346. https://www.researchgate.net/profile/Mohamed-Amr-2/publication/273137805_Iron_oxide_nanoparticles_applicability_for_heavy_metal_removal_from_contaminated_water/links/564350f408ae451880a32fb3/Iron-oxide-nanoparticles-applicability-for-heavy-metal-removal-from-contaminated-water.pdf

Azimi, A., Azari, A., Rezakazemi, M., & Ansarpour, M. (2017). Removal of heavy metals from industrial wastewaters: a review. *ChemBioEng Reviews*, *4*(1), 37-59. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cben.201600010

Baby, R., Hussein, M. Z., Abdullah, A. H., & Zainal, Z. (2022). Nanomaterials for the treatment of heavy metal contaminated water. *Polymers*, *14*(3), 583. https://www.mdpi.com/2073-4360/14/3/583

Bennicelli, R., Stępniewska, Z., Banach, A., Szajnocha, K., & Ostrowski, J. (2004). The ability of Azolla caroliniana to remove heavy metals (Hg (II), Cr (III), Cr (VI)) from municipal waste water. *Chemosphere*, *55*(1), 141-146. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653503011317

Calabrò, P. S., Bilardi, S., & Moraci, N. (2021). Advancements in the use of filtration materials for the removal of heavy metals from multicontaminated solutions. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, *20*, 100241. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468584421000131

Cornelio, O. M., & Marzo, F. R. (2021). Metodología para la reutilización de la basura tecnológica en la asignatura de Arquitectura de Computadoras. *UNESUM-Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria. ISSN 2602-8166*, *5*(2), 183-198. https://revistas.unesum.edu.ec/index.php/unesumciencias/article/view/397

Chibuike, G. U., & Obiora, S. C. (2014). Heavy metal polluted soils: effect on plants and bioremediation methods. *Applied and environmental soil science*, *2014*. https://www.hindawi.com/journals/aess/2014/752708/

Elbasiouny, H., Darwesh, M., Elbeltagy, H., Abo-Alhamd, F. G., Amer, A. A., Elsegaiy, M. A., Khattab, I. A., Elsharawy, E. A., Ebehiry, F., & El-Ramady, H. (2021). Ecofriendly remediation technologies for wastewater contaminated with heavy metals with special focus on using water hyacinth and black tea wastes: a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, *193*(7), 449. https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-021-09236-2

Elbehiry, F., Elbasiouny, H., Ali, R., & Brevik, E. C. (2020). Enhanced immobilization and phytoremediation of heavy metals in landfill contaminated soils. *Water, Air, & Soil Pollution*, *231*(5), 204. https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-020-04493-2

Fang, H. H., Xu, L.-C., & Chan, K.-Y. (2002). Effects of toxic metals and chemicals on biofilm and biocorrosion. *Water research*, *36*(19), 4709-4716. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135402002075

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

Grenni, P., Caracciolo, A. B., Mariani, L., Cardoni, M., Riccucci, C., Elhaes, H., & Ibrahim, M. A. (2019). Effectiveness of a new green technology for metal removal from contaminated water. *Microchemical Journal*, *147*, 1010-1020. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026265X1930270X

Gupta, A., & Balomajumder, C. (2015). Phytoremediation of heavy metals and its mechanism: A brief review. *Journal of Integrated Science and Technology*, *3*(2), 51-59. http://www.pubs.iscience.in/journal/index.php/jist/article/view/339

Khan, Z. I., Ugulu, I., Umar, S., Ahmad, K., Mehmood, N., Ashfaq, A., Bashir, H., & Sohail, M. (2018). Potential toxic metal accumulation in soil, forage and blood plasma of buffaloes sampled from Jhang, Pakistan. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, *101*, 235-242. https://link.springer.com/article/10.1007/s00128-018-2353-1

Klett, J., Mattos, I. B., Maier, H. J., e Silva, R. H., & Hassel, T. (2021). Control of the diffusible hydrogen content in different steel phases through the targeted use of different welding consumables in underwater wet welding. *Materials and Corrosion*, *72*(3), 504-516. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/maco.202011963

Kromah, V., & Zhang, G. (2021). Aqueous adsorption of heavy metals on metal sulfide nanomaterials: Synthesis and application. *Water*, *13*(13), 1843. https://www.mdpi.com/2073-4441/13/13/1843

Le Borgne, S., Romero, J., Videlan, H., Gonzalezn, J., & Saiz-Jiménez, C. (2007). Practical cases of the use of molecular techniques to characterize microbial deterioration of metallic structures in industry. CORROSION 2007,

Liu, L., Li, W., Song, W., & Guo, M. (2018). Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Science of the total environment*, *633*, 206-219.

Men, C., Wang, Y., Liu, R., Wang, Q., Miao, Y., Jiao, L., Shoaib, M., & Shen, Z. (2021). Temporal variations of levels and sources of health risk associated with heavy metals in road dust in Beijing from May 2016 to April 2018. *Chemosphere*, *270*, 129434. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653520336328

Novák, P. (2007). Environmental deterioration of metals. *Environmental Deterioration of Materials; Escrig, F., Managing Ed.; WIT Press: Boston*, 27-71. https://www.google.com/books?hl=es&lr=&id=9TCiyUfolawC&oi=fnd&pg=PA27&dq=Environmental+deterioration+of+metals+P.+Nov%C3%A1k&ots=F4IeKFnxXp&sig=D4PWaTR2_XeRb823ErN5AkUJKlc

Paul, D. (2017). Research on heavy metal pollution of river Ganga: A review. *Annals of Agrarian Science*, *15*(2), 278-286. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1512188716301142

Pohl, A. (2020). Removal of heavy metal ions from water and wastewaters by sulfur-containing precipitation agents. *Water, Air, & Soil Pollution*, *231*(10), 503. https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-020-04863-w

Pokhmurs' kyi, V. (2019). Development of investigations in the field of corrosion and stress-corrosion fracture of metals and the methods of their protection (A survey). *Materials Science*, *54*, 451-464. https://link.springer.com/article/10.1007/s11003-019-00205-2

Rezania, S., Ponraj, M., Talaiekhozani, A., Mohamad, S. E., Din, M. F. M., Taib, S. M., Sabbagh, F., & Sairan, F. M. (2015). Perspectives of phytoremediation using water hyacinth for removal of heavy

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com

metals, organic and inorganic pollutants in wastewater. *Journal of Environmental Management*, *163*, 125-133. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147971530222X

Sánchez, P. M. M., & Barrezueta, L. D. R. (2023). Centros de datos verdes en Ecuador: Una estrategia para disminuir la emisión de CO2 en los Centros de Datos ecuatorianos. *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, *16*(1), 1-18. https://publicaciones.uci.cu/index.php/serie/article/view/1229

Singh, J., Paswan, S., Saha, D., Pandya, A., & Singh, D. (2022). Role of air pollutant for deterioration of Taj Mahal by identifying corrosion products on surface of metals. *International journal of environmental science and technology*, 1-10. https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-021-03613-7

Tahir, M. B., Kiran, H., & Iqbal, T. (2019). The detoxification of heavy metals from aqueous environment using nano-photocatalysis approach: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*(11), 10515-10528. https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-019-04547-x

Tang, X., Zheng, H., Teng, H., Sun, Y., Guo, J., Xie, W., Yang, Q., & Chen, W. (2016). Chemical coagulation process for the removal of heavy metals from water: a review. *Desalination and water treatment*, *57*(4), 1733-1748. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19443994.2014.977959

Tran, T.-K., Chiu, K.-F., Lin, C.-Y., & Leu, H.-J. (2017). Electrochemical treatment of wastewater: Selectivity of the heavy metals removal process. *International Journal of hydrogen energy*, *42*(45), 27741-27748. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319917320645

Tsibulya, S., Starchak, V., Ivanenko, K., Bujalska, N., Kostenko, I., & Machulsky, G. (2022). Anthropogenic Impact of the Environmental Pollution with Heavy Metals on the Corrosion Protection of Metal Structures. *Materials Science*, *57*(6), 813-822. https://link.springer.com/article/10.1007/s11003-022-00613-x

Tsybulya, S., Starchak, V., Ivanenko, K., Buyalskaya, N., & Kostenko, I. (2017). Effect of radioactive contamination of the medium on the durability of steel 20. *Radiochemistry*, *59*, 534-539. https://link.springer.com/article/10.1134/S1066362217050162

Zhang, H., Hu, X., Li, T., Zhang, Y., Xu, H., Sun, Y., Gu, X., Gu, C., Luo, J., & Gao, B. (2022). MIL series of metal organic frameworks (MOFs) as novel adsorbents for heavy metals in water: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 128271. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389422000590

Zhang, S., Tian, Y., Guo, H., Liu, R., He, N., Li, Z., & Zhao, W. (2022). Study on the occurrence of typical heavy metals in drinking water and corrosion scales in a large community in northern China. *Chemosphere*, *290*, 133145. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653521036171

Esta obra está bajo una licencia *Creative Commons* de tipo (CC-BY-NC-SA).

Grupo Editorial "ALEMA-Pentaciencias" E-mail: alema.pentaciencias@gmail.com