



Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), mayo-junio 2024,
Volumen 8, Número 3.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3

NANOREMEDIACIÓN: ALTERNATIVA A LA CONTAMINACIÓN MINERA EN MÉXICO

**NANOREMEDIATION: MEXICO'S ALTERNATIVE
TO MINING POLLUTION**

Mariana Ramírez Herrera

Universidad Autónoma de Zacatecas, México

Elena Donají Ramírez Alvarado

Universidad Autónoma de Zacatecas, México

Alonso Efraín Hernández Montes

Universidad Autónoma de Zacatecas, México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3.11404

Nanoremediación: Alternativa a la Contaminación Minera en México

Mariana Ramírez Herrera¹mrramirez@uaz.edu.mx<https://orcid.org/0000-0003-0355-6285>Universidad Autónoma de Zacatecas
México**Elena Donají Ramírez Alvarado**donajiramirez@uaz.edu.mx<https://orcid.org/0000-0003-4200-9348>Universidad Autónoma de Zacatecas
México**Alonso Efraín Hernández Montes**38191032@uaz.edu.mxUniversidad Autónoma de Zacatecas
México

RESUMEN

Las nuevas tecnologías traen consigo mayor beneficio económico para la empresa y potenciales ventajas en la eficiencia productiva. También conllevan implicaciones sociales y potenciales riesgos a la salud y el ambiente. En las últimas décadas las demandas políticas por mejoras ambientales han incentivado las investigaciones que apoyen tecnologías ambientalmente más sustentables. Uno de los sectores reconocidamente más degradantes y contaminantes del ambiente es el de la minería, y una de las tecnologías más novedosas es la aplicación de nanotecnologías en los procesos productivos, tanto en la prospección y extracción como en el beneficio del material. Con el propósito de crear un instrumento que facilite contrastar los avances de investigación en la materia con las posibles aplicaciones en la práctica por parte de las corporaciones mineras, aquí se realiza una revisión bibliográfica de artículos que tratan sobre remediación ambiental con nanotecnologías en minería.

Palabras clave: nanopartículas, metales pesados, remediación minera, riesgos a la salud

¹ Autor principal

Correspondencia: mrramirez@uaz.edu.mx

Nanoremediation: Mexico's alternative to Mining Pollution

ABSTRACT

New technologies bring more significant economic benefits to the company and potential advantages in productive efficiency. They also carry social implications and potential risks to health and the environment. In recent decades, political demands for environmental improvements have encouraged research that supports more environmentally sustainable technologies. In this sense, one of the most recognizably degrading and polluting sectors of the environment is mining, and one of the most innovative technologies is the application of nanotechnologies in the productive processes of mining, both in prospecting and extraction and in the benefit of the material. To create an instrument that facilitates contrasting research advances in the field with possible applications in practice by mining corporations, here is a bibliographic review of articles that deal with environmental remediation with nanotechnologies in mining.

Keywords: nanoparticles, heavy metals, risks, environment

Artículo recibido 20 abril 2024

Aceptado para publicación: 25 mayo 2024



INTRODUCCIÓN

La ciencia y la tecnología a Nanoescala es un campo relativamente reciente pero también uno de los que más rápido ha avanzado en el mundo en las últimas décadas. Actualmente, la nanotecnología se utiliza en prácticamente todos los sectores industriales, en las industrias química, manufacturera, aeroespacial y en las TICs, además de estar presente en miles de productos de uso científico, pero también de uso cotidiano como en los cosméticos, productos de limpieza o textiles, compuestos cuyas características facilitan su absorción o bien enriquecen su composición y resistencia (Drexler & Pamlin, 2013, pp. 24–25; Tsuzuki, 2009). Pese a que sus aparentes beneficios son múltiples, los riesgos son inciertos (Saldívar–Tanaka, 2019).

Existen sectores económicos que se benefician del uso de las nanotecnologías como la minería. Sin embargo, el interés de este artículo radica en su aplicación como estrategia de remediación ambiental; habida cuenta de a los efectos que la contaminación por metales pesados tiene sobre la naturaleza en su conjunto.

La nanoremediación se ha convertido en un método de absorción de metales pesados que permite limpiar espacios contaminados con residuos de relaves mineros. En México, sin embargo, pese a la extensión de la actividad minera, las técnicas de remediación no se están utilizando debido por una parte, a que la normativa y el gobierno no obligan a ello, y por la otra, a que estos procesos suelen ser costosos por su alto grado tecnológico y para las empresas elevar sus costos no forma parte de sus planes. A continuación, se realiza una revisión bibliográfica sobre los métodos de remediación mediante nanotecnología más utilizados en la minería, sus resultados e implicaciones.

METODOLOGÍA

La nanoremediación se ha convertido en una alternativa para la limpieza del ambiente, con posibilidades de prevención, detección, monitoreo y remediación de la contaminación por metales pesados, desechos radioactivos, de aguas residuales y manejo de residuos sólidos, entre otros (Bhandari, 2018, pp. 303–304). Por ello, es importante conocer los alcances y limitaciones de la nanoremediación, particularmente aquella empleada en la minería.

En este apartado se revisan 28 artículos publicados entre 2010 y 2022, sobre diversos esquemas de nanoremediación utilizados para reducir la presencia de metales pesados en suelo y agua alrededor del mundo, con el propósito de investigar su aplicación en México en posteriores estudios.

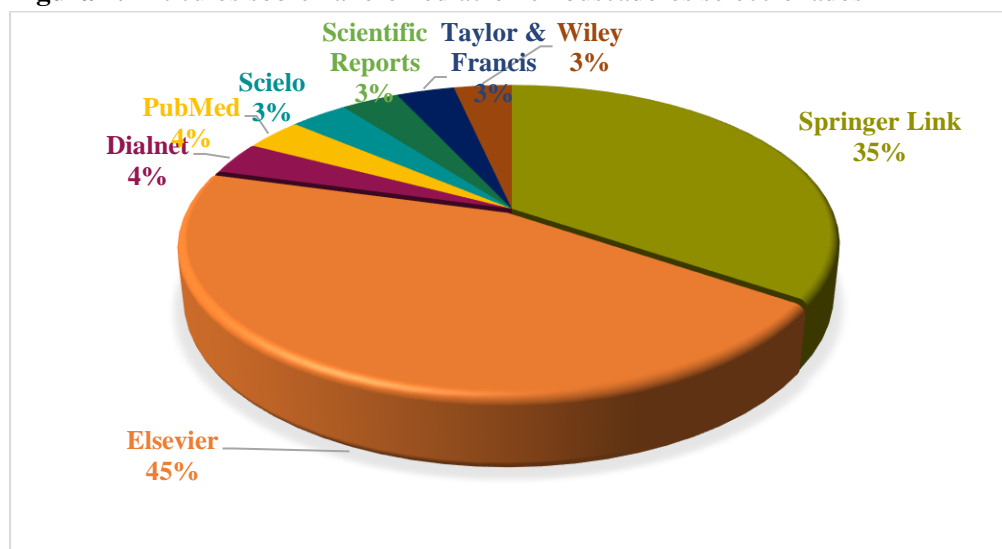
Los motores de búsqueda donde se concentraron las publicaciones sobre nanoremediación que aquí se presentan fueron: Elsevier (ScienceDirect), Springer Link, Scielo, Dialnet y Wiley Online Library. La revisión se limitó a las publicaciones entre 2010 y 2022 sobre los efectos de la nanoremediación en ambientes controlados y en sitios contaminados. La búsqueda en revistas científicas se realizó en español e inglés.

La exploración inicial se realizó por palabra clave, es decir, mediante el tema y título específico: *Nanoremediación / Nanoremediation*, desechando cualquier otro tipo de remediación, en los buscadores seleccionados. Sobre los resultados se utilizó el descriptor: *en metales pesados* o *minería*, con la intención de excluir información sobre otro tipo de contaminantes o desechos tóxicos en el cuerpo de los artículos encontrados.

Si bien, también se buscó en Jstor, Knovel, Emerald Insight, Oxford Journals y Sage Journals, el volumen de publicaciones sobre el tema fue escaso y la mayor parte de los resultados no correspondieron a los descriptores utilizados para depurar la exploración.

En la Figura 1 se muestran los porcentajes obtenidos por cada motor de búsqueda respecto al tema principal y sus descriptores.

Figura 1. Artículos sobre nanoremediación en buscadores seleccionados



Fuente: Elaboración propia con información de la revisión bibliográfica sobre Nanoremediación.

Posteriormente, una vez descargados, se revisó el abstract de cada uno de ellos para excluir los artículos cuyo contenido tratara sobre *regulación, principio precautorio*, y cuestiones relacionadas con reglamentaciones locales o internacionales, limitando la búsqueda a las tecnologías desarrolladas y sus posibilidades de aplicación en la minería, dejándose fuera otras industrias contaminantes como la moda, el sector energético y el transporte. Finalmente, se revisaron los documentos para identificar el planteamiento central de cada uno de ellos e identificar los principales metales a remediar, el medio que se pretende remediar (agua, suelo o aire) y la etapa o fase del proceso productivo sobre la que se actúa. Dado que cada buscador contiene artículos que corresponden a editores exclusivos, fue sencillo no repetir artículos durante la exploración.²

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Argumentos para la nanoremediación en minería

Son varios los mecanismos mediante los cuales se argumenta que las nanotecnologías tienen la capacidad de remediar el agua y el suelo que son contaminados como resultado de la actividad minera. Aunque la nanoremediación también tiene la capacidad de permitir la reutilización de los metales capturados, por lo que se convierte en una herramienta útil para la industria. Aquí se revisan los metales que más se repiten en la literatura.

El primero de los elementos que capta el interés de los artículos para su remediación es el Arsénico (As), con un 46.43 %, debido a su alto factor de toxicidad, cuya exposición humana “puede inducir lesiones en la piel, cáncer y tener efectos nocivos en los sistemas respiratorio, circulatorio, nervioso y reproductivo” (Azari & Bostani, 2017; Gil-Díaz et al., 2019, p. 166; Zhang et al., 2010). El segundo en ser repetido es el Zinc (Zn), seguido por el Cromo (Cr), Cadmio (Cd), Plomo (Pb) y Cobre (Cu), metales que por su composición pueden ser dañinos para el ambiente y los seres humanos.

Respecto a los métodos utilizados, 46.4 % de las publicaciones revisadas presentaron como alternativa de remediación el Hierro de Valencia Cero a Nanoescala (nZVI), por ser un metal reactivo no tóxico, siendo el método más utilizado para remover diferentes tipos de contaminantes “incluidos los compuestos clorados, pesticidas organoclorados, bifenilos policlorados, iones de metales pesados como

² Por dificultades en los motores de búsqueda de Scielo y Redalyc no se avanzó en esta etapa con estas fuentes que tienen la mayoría de los artículos en español y portugués.

arsénico y cromo, además de compuestos orgánicos como nitratos y aniones inorgánicos” (Bhandari, 2018, p. 305).

Además del Hierro de Valencia Cero a Nanoescala (nZVI), se han utilizado otros materiales como los nanotubos de carbón (CNTs); el dióxido de titanio nanocrystalino (TiO₂); las Nanoarcillas; así como las Nanopartículas (NPs), entre las que destacan las de óxido de hierro (α -Fe₂O₃), las de óxido de circonio (α -ZrO₂), las de plata (nAg), y las de Goethita (α -FeOOH) (Luo et al., 2021; Marcon et al., 2021; Nicomel et al., 2016). También se le ha dado relevancia a la nanoremediación mediante algunos Óxidos de Manganeso como la Magnetita (Fe₃O₄) que es señalada como una nanopartícula con excelentes resultados en la regulación de la concentración de Zn, Cd y Cu en el agua (Flores-Guia et al., 2021). A estos materiales se unen las Nanopartículas a base de sulfuro de Hierro (nFeS), debido a “su capacidad de inmovilizar metales doble-Valentes” (Borja-Borja et al., 2020).

El medio que más se busca remediar es el suelo, con un 85.7 % de las investigaciones que son abordadas por los artículos encontrados, seguido por el agua con un 42.9 % y el aire con un 17.9 %. En este sentido, el 91.7 % de los artículos que estudiaron el (nZVI) como alternativa de nanoremediación se concentraron en el suelo, la mayoría en los jales de las minas, aunque también se hicieron pruebas sobre suelo agrícola.

En el Cuadro 1 se listan los metales, métodos y medios de nanoremediación revisados aquí, lo que permite identificar la relación que éstos mantienen entre sí, además de ampliar el conocimiento sobre otros materiales que también son utilizados en la nanoremediación minera en el mundo.

Cuadro 1. Información sobre Nanoremediación en revistas científicas (2010-2021) en buscadores seleccionados

Métodos de Nanoremediación	Metal(es) a remediar	Etapa de residuos			
		Jales	Agua	Suelo	Aire
(nZVI)	Hg, Cd, Cr y Pb		X	X	X
(nZVI)	As y Hg	X		X	
(nZVI)	As, Cu, Hg, Pb y Zn	X		X	
(nZVI)	Cr (VI)	X		X	
(nZVI)	No especifica		X	X	

Nanobiotechnology	Zn, As, Pb, Cr				X
(nZVI)	Pb, Zn, Cd				X
(nZVI)	Cd, Pb, Zn	X			X
(nZVI)	As	X			X
(nZVI), (nFeS) y magnetita (Fe ₃ O ₄)	As	X			X
(nZVI) estabilizado con CMC(CMC-nZVI)	Cd, Pb, Zn	X			X
Nanocompuestos de hormigón / maghemita	As	X	X		X
Nanomateriales	Cd, Cr y Pb	X			X
Nanoparticulas	Cr (VI)	X			X
Nanomateriales hechos de carbono, Ti, Fe y Zr	As	X	X		
Nanoparticulas	No especifica	X	X		
Nanopartículas de óxido de grafeno (nGOx)	As, Pb, Cu, Zn y Cd	X			X
Compuestos a base de lantanidos (nZVI)	No especifica	X	X	X	X
(nZVI)	As				X
(nZVI) y nanotubos de carbono y nanofibras	No especifica	X	X	X	X
Nanoarcillas	As	X	X		
Nanomateriales de carbono, silice ya base de metal	Pb, Zn, Cr, Cu, Hg, As	X	X	X	X
Nanomateriales	Hg, Pb, Cr, Ni, Co, Cu, Cd, As		X	X	
Nanopartículas de TiO ₂	As	X			X
Óxidos metálicos nanoestructurados		X	X		
Remediación a base de fosfato	Pb (II), Cd (II), Zn (II) y Cu (II)	X	X	X	
Nanopaticulas, biocarbón (nZVI)	No especifica				X
	Pb y Zn	X			X

Fuente: Elaborado por Mariana Ramírez Herrera con información de la revisión bibliográfica sobre Nano.

(nZVI): Hierro de valencia cero a nanoescala.

(nFeS): Nanopartículas de Sulfuro de Hierro

Respecto a la aplicación del (nZVI), los resultados encontraron que la reducción de contaminantes es mayor las primeras 72 horas a partir de su aplicación, aunque es necesario realizar por lo menos dos

aplicaciones para inmovilizar totalmente la disponibilidad de metales pesados (Gil-Díaz et al., 2019, p. 168). Para maximizar los resultados, el (nZVI) se ha adoptado como un método complementario que puede ser utilizado como un tratamiento previo al *proceso de lavado del suelo*,³ que no altera las propiedades químicas de la materia (Boente et al., 2018, p. 56; Cao et al., 2018).

Dadas las características del (nZVI) -rápida aglomeración e interacción magnética, su reactividad y movilidad pueden reducir su eficacia, incluso “destruir las propiedades del suelo y disminuir su fertilidad debido a su fuerte reactividad, que afecta negativamente la reutilización del suelo y la regeneración de las plantas”, por lo que algunos recomiendan su uso en conjunción con otras técnicas como el *biocarbón* (nZVI@BC) con excelentes resultados en la remediación de Cromo (Cr) (Su et al., 2016). Otra alternativa complementaria es la *fitoremediación*, es decir, el uso de plantas con elevados grados de bioacumulación, por las posibilidades que esto presenta para la descontaminación del suelo debido a que los metales pesados no sólo son neutralizados sino absorbidos, lo que además permite la recuperación (Covarrubias & Peña Cabriales, 2017).

Asimismo, con la finalidad de minimizar la agregación y maximizar la movilidad del (nZVI) se han utilizado varios estabilizadores como el *alginato de sodio* (SnZVI) para inmovilizar el Cadmio (Cd) (Huang et al., 2016), y el *carboximetil celulosa* (CMC-nZVI) (Shi et al., 2015, p. 18), aumentando la eficacia en la remediación del suelo contaminado por Cromo (Cr) y mejorado “la inmovilización del Cr, su lixiviación, biodisponibilidad y bioacumulación en plantas”, elevando la factibilidad de la remediación en tierras cultivables, aunque se aclara que si bien la toxicidad puede reducirse con este sistema, no se elimina por completo el metal del suelo (Wang et al., 2014, pp. 230–231).

Otros autores, sin embargo, advierten de la parcial efectividad del (nZVI) en la eliminación de metales pesados, así como de los riesgos de afectar las propiedades del suelo y la falta de recuperación de la biodiversidad (Azeez et al., 2021; Fajardo et al., 2020; Mar Gil-Díaz et al., 2014).

Otra cuestión que se ha estudiado es cómo la nanoremediación y los nanoprocesos pueden ayudar a recuperar y reutilizar los metales pesados, desarrollándose “numerosas nano-estructuras que incluyen

³ “El método abarca dos tecnologías de eliminación de contaminantes, a saber, 1) la separación física, que se basa en tecnologías de procesamiento de minerales y 2) en la extracción química, que se basa en la hidrometalurgia” (Boente et al., 2018, p. 56).

membranas de nano-filtración, nanotubos, nano-mallas, tubos nanocompuestos, filtros nanofibrosos y nanoimanes” para absorber y recuperar metales pesados (Thangadurai et al., 2021).

Todas estas nanotecnologías para remediar no necesariamente se encuentran libres de críticas, ya que ellas mismas pueden generar riesgos a los ecosistemas y a la salud, a través de una amplia gama de cambios en el PH y el contenido de humedad o mayor potencial de oxidación del suelo, por lo que algunos autores recomiendan ser cautos en su uso sobre zonas de cultivo (Ye et al., 2017).

Nanoremediación minera en México

Desde la llegada de los españoles México se convirtió en un país minero, actividad que ha prevalecido hasta nuestros días. De acuerdo con el Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, en el 2019 fue el sexto país productor de Zinc y el quinto de Plomo, colocándolo entre los 10 productores de metales más importantes en el mundo (SGM, 2020).

México cuenta con inversión de dos de las más importantes compañías mineras de plata en el mundo por su volumen de ganancias: Industrias Peñoles y Fresnillo PLC.⁴ De hecho, tres de los nueve principales proyectos mineros en el mundo pertenecen a estas empresas, a las que se añade Grupo México, que junto al resto de empresas mineras que operan en territorio nacional colocaron a México como el primer productor de plata en el mundo en el año 2020 (SGM, 2021b, pp. 4–5). En el Cuadro 2 se muestran los principales productores de plata en el país, de acuerdo con su volumen de producción.

Cuadro 2. Producción nacional de plata por unidad minera en 2020 (principales)

Unidad	Empresa	Estado	Millones de Oz
Peñasquito	Newmont (Goldcorp)	Zacatecas	27.80
Saucito	Fresnillo PLC	Zacatecas	15.53
San Julián	Fresnillo PLC	Chihuahua	13.31
Fresnillo	Fresnillo PLC	Zacatecas	13.05
San Dimas	First Majestic Silver	Durango	6.40
Palmarejo	Coeur Mining	Chihuahua	6.27
San José	Fortuna Silver	Oaxaca	6.16
Tizapa	Industrias Peñoles	Estado de México	5.97
La Ciénega	Fresnillo PLC	Durango	5.76
La Colorada	Pan American Silver	Zacatecas	5.02
Total			105.27

Fuente: Tomado íntegro de (SGM, 2021b, p. 17).

⁴ Para más información véase [Online]: <https://www.investopedia.com/articles/investing/022516/worlds-top-5-silver-mining-companies.asp>

Destaca que el 50.94 % de la producción de plata en el país se realiza por empresas nacionales, el 43.11 % por compañías canadienses y el 5.96 % por una empresa norteamericana. Sin embargo, pese a su tamaño y gran capacidad tecnológica, estas empresas no han sido capaces de lograr que sus prácticas de exploración, producción, desarrollo y recuperación sean suficientemente sustentables, pues la degradación ambiental generada por la minería en México coloca a esta actividad como la más contaminante, de acuerdo con las cifras del Producto Interno Neto ajustado ambientalmente que publica el INEGI.⁵

Ahora bien, para que estas nuevas tecnologías se apliquen es necesario que la reglamentación y normatividad del Estado obligue a su aplicación, es decir, que el gobierno presione a las grandes corporaciones mineras para que efectivamente puedan mejorarse las condiciones ambientales. En México existen tres Normas Oficiales que establecen las especificaciones y criterios de cierre y postoperación minera, cuya aplicación es obligatoria: NOM-141-SEMARNAT-2003, NOM-155-SEMARNAT-2007 y NOM-159-SEMARNAT-2011.⁶

En la NOM-141-SEMARNAT-2003 se establece el procedimiento de *Postoperación de Presas de Jales*, sin embargo, se deja a las empresas mineras la responsabilidad de “aplicar las pruebas de extracción de los constituyentes tóxicos de los jales, así como llevar a cabo los estudios que le permitan identificar a los elementos del ambiente y biota que sean susceptibles de daño por el depósito de jales”. Asimismo, los criterios de Postoperación se limitan a señalar que una vez que el jal concluya su periodo de utilidad, los ‘generadores’ (empresas mineras) deberán evitar que se emitan partículas sólidas a la atmósfera, no se formen escurrimientos y no falle la presa, que se realicen monitoreos semestrales de aguas subterráneas y superficiales, que se desarrollen programas para proteger especies en riesgo y que se mantenga una bitácora con las actividades realizadas; aunque no se señala ningún tipo de supervisión estas actividades por parte de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT o de algún otro organismo (NOM-141, 2004, pp. 18–20).⁷

⁵ Véase el Producto Interno Neto Ajustado Ambientalmente, por sector económico 2003-2019. INEGI. [Online]: <https://www.inegi.org.mx/temas/ee/#Tabulados>

⁶ En México las Normas Oficiales (NOM) “son regulaciones técnicas de carácter obligatorio”, mientras que en las Normas Mexicanas (NMX) “su aplicación es voluntaria”. Véase *Catálogo Mexicano de Normas* [Online]: <http://www.2006-2012.economia.gob.mx/comunidad-negocios/normalizacion/catalogo-mexicano-de-normas>

⁷ La Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, “establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales” (NOM-141, 2004).

En la NOM-155-SEMARNAT-2007 se establecen los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata, utilizando como *Criterios para el cierre del patio* (sitio del sistema de lixiviación) los siguientes: prevenir la erosión hídrica y eólica, garantizar la estabilidad física del sitio, evitar la formación de drenaje ácido o en su caso establecer medidas de tratamiento para evitar daños en cuerpos de agua, suelos y sedimentos. Asimismo, se señala el procedimiento de inhabilitación, pero no se describen procedimientos para la remediación por emisión de metales y metaloides. Sin embargo, sí se especifica que el monitoreo deberá realizarse anualmente por 20 años (NOM-155, 2007, pp. 23–25).

En la NOM-159-SEMARNAT-2011 se establecen los requisitos de protección ambiental de los sistemas de lixiviación de cobre, cuyos *Criterios de cierre* son: estabilidad química, estabilización del sistema de lixiviación, estabilización física, y prevención de dispersión de contaminantes. Se consideran también ciertas medidas para la restauración del sistema de lixiviación, pero ninguna de ellas se refiere a la remediación del sitio. En cuanto al monitoreo, sólo se establece que éste debe realizarse con una periodicidad de seis meses, sin manejarse un periodo específico de monitoreo como en el caso anterior (NOM-159, 2011, pp. 20–23).

En ningún punto de las normas revisadas se señala la necesidad de remediar espacios contaminados, las Normas sólo se remiten al monitoreo de los jales o sitios de lixiviación, pero no a las posibles afectaciones por contaminación más allá de la instalación minera, lo que representa un enorme reto de cara a la remediación de las comunidades aledañas. Lo mismo ocurre con la del sector minero elaborada por la SEMARNAT, en la que sólo se señalan como acciones para la *Etapa de abandono del sitio (post-operación)*: “describir el programa tentativo de abandono del sitio, enfatizando en las medidas de rehabilitación, compensación y restitución”, sin mencionar ningún tipo de proceso específico, seguimiento o monitoreo por parte de la autoridad correspondiente (SEMARNAT, 2002, p. 38).

Como se revisó, la Norma Oficial Mexicana no aborda esquemas de remediación obligatorios, ni siquiera los menciona como alternativas, ésta es una de las razones que permiten a las empresas mineras no sentirse obligadas a realizar estas actividades al cierre de sus operaciones. Otro desincentivo importante es que una buena parte de las estas compañías son de capital extranjero, lo que dificulta aun más que se lleven a cabo los monitoreos sobre los sitios abandonados.

En el Anuario Estadístico de la Minería Mexicana 2020, en el apartado sobre *Inversión de empresas con participación extranjera en México*, se describe la distribución geográfica de los Proyectos de Empresas con Inversión Extranjera en el país, siendo Sonora (23.19 %), Chihuahua (13.19 %), Durango (10.59 %), Sinaloa (10 %) y Zacatecas (7.56 %), los estados con mayor presencia de inversión foránea en esta materia. Asimismo, se señala que el 69.83 % de esas inversiones son de origen canadiense, el 10.6 % norteamericana y el 4.47 % china. Del total de la inversión extranjera, el 61.93 % se concentra en la explotación de oro y plata, que es donde la minería es más rentable (SGM, 2021a, pp. 418–419, 421).

Ahora bien, de acuerdo con la información que aparece en la página del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) “los elementos potencialmente tóxicos comúnmente presentes en los jales de las minas mexicanas son: plomo, cadmio, zinc, arsénico, selenio y mercurio”⁸ metales y metaloides que son los mismos que se busca remediar mediante la Nanotecnología, como se observa en el Cuadro 1.

En México se hace uso de diferentes esquemas de explotación minera, la más antigua es la subterránea, pero en las últimas décadas ha adquirido mayor peso la de tajo a cielo abierto, que aumenta a la par del número de proyectos mineros en México, los cuales pasaron de 677 en 2010 a 1531 en el 2018 (FUNDAR, 2019, p. 29). Según se reconoce por el Servicio Geológico Mexicano, “a diciembre de 2019, existían 24,066 concesiones mineras que representan un área de aproximadamente 16.83 millones de hectáreas, equivalentes al 8.59 % del territorio nacional” (SGM, 2020, p. 18).

En este sentido, el método de beneficio más usado en México y el mundo es mediante la lixiviación por cianuro, este proceso es altamente contaminante debido a que para obtener el Cobre (Cu) y el Oro (Au) es necesario separarlo del Arsénico (As), convirtiéndolo en uno de los desechos más tóxicos de la minería.⁹ Con la introducción de la lixiviación química en la extracción de minerales inicia un proceso de explotación industrial que produce una contaminación silenciosa pero profunda de todos los componentes de la naturaleza ubicados en las zonas mineras y sus alrededores, dado que los riesgos de

⁸ Véase “Los residuos en la minería mexicana”, apartado 2.2. Concepto de toxicidad potencial en (Gutiérrez Ruiz & Moreno Turrent, 2007).

⁹ Véase “Proceso hidrometalúrgico para la recuperación de oro a partir de minerales refractario-arsenicales, pasivación y disposición de sus residuos sin impactos ambientales” (Pillhuaman Zambrano, 2013).

la minería radican fundamentalmente en la extracción de los minerales que se realiza para separar los distintos metales y aumentar su recuperación, pues es en tales procesos donde se añaden, se procesan y se extraen sustancias tóxicas y oxidantes, altamente dañinas para el ambiente. En la actualidad, la cianuración o lixiviación química es el método más utilizado para la extracción de oro y plata:

En este proceso el mineral molido se pone en contacto con una solución alcalina diluida de cianuro, el cual disuelve selectivamente los metales preciosos dejando las otras especies minerales en forma sólida. Una etapa de electrólisis donde se depositan los metales preciosos en forma metálica (Nava-Alonso, 2018, pp. 22–23).

Ahora bien, de acuerdo con el primer Listado de Actividades Altamente Riesgosas, expedido por las Secretarías de Gobernación y Desarrollo Urbano y Ecología, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 28 de marzo de 1990, la mayoría de las sustancias empleadas en la extracción de oro y plata son altamente riesgosas en las concentraciones utilizadas y/o generadas por la industria minera.¹⁰ Por tal motivo, las empresas están obligadas a presentar estudios de riesgo y contención en caso de fugas o derrames, con base en el Artículo 147 de la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA).

La LGEEPA establece en su Artículo 1º que se debe garantizar: “La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente” (1). Mientras que el INECC advierte que “dentro de los contaminantes que se consideran prioritarios en México debido a su alta toxicidad y a su persistencia en el ambiente, se encuentran: Mercurio (Hg), Plomo (Pb), Cromo (Cr), Cadmio (Cd), compuestos tóxicos atmosféricos”,¹¹ entre otros, y una de las fuentes de estos contaminantes son las actividades relacionadas con la minería.

Sin embargo, como ya se explicó, en México las compañías mineras no están obligadas a realizar procesos de remediación por la actividad minera. En el caso mexicano, dados los metales pesados desechados por la industria minera, de acuerdo con la literatura revisada existen alternativas de

¹⁰ Véase DOF 28 de marzo 1990.

¹¹ “Debido al desarrollo y modernización en los procesos de extracción y procesamiento de los recursos minerales, así como a la generación de grandes cantidades de residuos provenientes de sus procesos, la industria minera en México ha generado por décadas una gran cantidad de desechos y sitios contaminados a lo largo de todo el país.” Véase: [http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/372/fuentes.html#:~:text=Entre%20las%20causas%20que%20han.en%20instalaciones%20petroleras%3B%20\(iii\)](http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/372/fuentes.html#:~:text=Entre%20las%20causas%20que%20han.en%20instalaciones%20petroleras%3B%20(iii))

neutralización mediante esquemas de nanoremediación con Hierro de valencia cero a nanoescala (nZVI) utilizando algún estabilizador y combinado con algún otro esquema biológico y amigable con el ambiente como la fitoremediación o el biocarbón para potenciar su acción neutralizante, sobre todo porque, pese a que puede reducir la fertilidad del suelo es el más efectivo para inmovilizar metales pesados, reduciendo la toxicidad de la tierra, aun a pesar de no eliminar por completo estos contaminantes. También es importante señalar que es uno de los procesos menos costosos en relación con otros basados en nanotecnología y, finalmente, ha sido el más utilizado y probado en el mundo, demostrando su eficacia.

CONCLUSIONES

La nanoremediación es una tecnología relativamente nueva para limpiar espacios contaminados por sustancias tóxicas como los metales pesados; sin embargo, los costos de su desarrollo y aplicación así como la laxitud de las normas mexicanas para su implementación, no han incentivado su implementación como estrategia cotidiana de las compañías mineras una vez que se efectúa el cierre de las minas.

Dada la extensión de la minería en el país y la contaminación que esta actividad produce en el territorio nacional, afectando comunidades y ecosistemas enteros, es importante conocer distintos esquemas de remediación. La nanoremediación es una alternativa que empieza a estudiarse e implementarse, la cual ha resultado viable en combinación con otros mecanismos que faciliten la contención de metales pesados con la menor afectación de los elementos a ser remediados, sobre todo suelo y agua por sus implicaciones económicas además de las ambientales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Azari, P., & Bostani, A. A. (2017). Reducing As availability in calcareous soils using nanoscale zero valent iron. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(25), 20438–20445.

<https://doi.org/10.1007/s11356-017-9447-x>

Azeez, N. A., Dash, S. S., Gummadi, S. N., & Deepa, V. S. (2021). Nano-remediation of toxic heavy metal contamination: Hexavalent chromium [Cr(VI)]. *Chemosphere*, 266, 129204.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129204>



- Bhandari, G. (2018). Environmental Nanotechnology: Applications of Nanoparticles for Bioremediation. In E. A. (eds.) R. Prasad (Ed.), *Nanotechnology in the Life Sciences* (pp. 301–315). Springer Science and Business Media B.V.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-02369-0_13.
- Boente, C., Sierra, C., Martínez-Blanco, D., Menéndez-Aguado, J. M., & Gallego, J. R. (2018). Nanoscale zero-valent iron-assisted soil washing for the removal of potentially toxic elements. *Journal of Hazardous Materials*, 350, 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.02.016>
- Borja-Borja, J. M., Heredia-Moyano, S. F., & Sáez-Paguay, M. Á. (2020). Los nanomateriales y sus aplicaciones en la remediación ambiental. *Polo Del Conocimiento*, 5(7), 338–370.
<https://doi.org/10.23857/pc.v5i7.1517>
- Cao, Y., Zhang, S., Zhong, Q., Wang, G., Xu, X., Li, T., Wang, L., Jia, Y., & Li, Y. (2018). Feasibility of nanoscale zero-valent iron to enhance the removal efficiencies of heavy metals from polluted soils by organic acids. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 162, 464–473.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.07.036>
- Covarrubias, S. A., & Peña Cabriales, J. J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 33, 7–12.
<https://doi.org/https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.01>
- Drexler, E., & Pamlin, D. (2013). *Nano. Unleashing the fourth technological revolution*.
https://www.oxfordmartin.ox.ac.uk/downloads/academic/201310Nano_Solutions.pdf
- Fajardo, C., Sánchez-Fortún, S., Costa, G., Nande, M., Botías, P., García-Cantalejo, J., Mengs, G., & Martín, M. (2020). Evaluation of nanoremediation strategy in a Pb, Zn and Cd contaminated soil. *Science of the Total Environment*, 706. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136041>
- Flores-Guia, T. E., Cano Salazar, L. F., Martínez-Luévanos, A., & Claudio-Rizo, J. A. (2021). Manganese Oxides: Synthesis and Application as Adsorbents of Heavy Metal Ions. In O. V. Kharissova et al (Ed.), *Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications* (pp. 2409–2428). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-36268-3_153



- FUNDAR. (2019). *Anuario 2018. Las actividades extractivas en México. Desafíos para la 4T*.
<https://fundar.org.mx/publicaciones/actividades-extractivas-en-mexico-anuario-2018/>
- Gil-Díaz, M., Rodríguez-Valdés, E., Alonso, J., Baragaño, D., Gallego, J. R., & Lobo, M. C. (2019).
Nanoremediation and long-term monitoring of brownfield soil highly polluted with As and Hg.
Science of the Total Environment, 675, 165–175.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.183>
- Gutiérrez Ruiz, M. E., & Moreno Turrent, M. (2007). *Los residuos en la minería mexicana*. Instituto
Nacional de Ecología y Cambio Climático.
http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/35/los_residuos.html
- Huang, D., Xue, W., Zeng, G., Wan, J., Chen, G., Huang, C., Zhang, C., Cheng, M., & Xu, P. (2016).
Immobilization of Cd in river sediments by sodium alginate modified nanoscale zero-valent iron:
Impact on enzyme activities and microbial community diversity. *Water Research*, 106, 15–25.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.09.050>
- Luo, T., Yang, C., Tian, X., Luo, W., Nie, Y., & Wang, Y. (2021). Application of Iron Oxide
Nanomaterials for the Removal of Heavy Metals. In O. V. Kharissova et al. (eds.) (Ed.),
Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications
(pp. 2067–2091). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36268-3_76
- Mar Gil-Díaz, M., Pérez-Sanz, A., Ángeles Vicente, M., & Carmen Lobo, M. (2014). Immobilisation
of Pb and Zn in soils using stabilised zero-valent iron nanoparticles: Effects on soil properties.
Clean - Soil, Air, Water, 42(12), 1776–1784. <https://doi.org/10.1002/clen.201300730>
- Marcon, L., Oliveras, J., & Puentes, V. F. (2021). In situ nanoremediation of soils and groundwaters
from the nanoparticle's standpoint: A review. *Science of the Total Environment*, 791.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148324>
- Nava-Alonso, F. (2018). Retos actuales en la extracción de metales preciosos en México. *Universtarios*
Potosinos, 22–25.
<http://www.uaslp.mx/Comunicacion-Social/Documents/Divulgacion/Revista/Catorce/221/221-05.pdf>



- Nicomel, N. R., Leus, K., Folens, K., van der Voort, P., & du Laing, G. (2016). Technologies for arsenic removal from water: Current status and future perspectives. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 13, Issue 62, pp. 1–24). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijerph13010062>
- Pillihuaman Zambrano, A. (2013). Proceso hidrometalúrgico para la recuperación de oro a partir de minerales refractario-arsenicales, pasivación y disposición de sus residuos sin impactos ambientales. *Portal de Soluciones Tecnológicas Integrales*. <https://www.pucp.edu.pe/soluciones-tecnologicas/proyectos/proceso-hidrometalurgico-para-la-recuperacion-de-oro-a-partir-de-minerales-refractario-arsenicales-pasivacion-y-disposicion-de-sus-residuos-sin-impactos-ambientales/>
- Saldívar–Tanaka, L. (2019). Regulando la nanotecnología. *Mundo Nano*, 12(22), 1e–21e. <http://www.mundonano.unam.mx/ojs/index.php/nano/article/view/63140>
- SEMARNAT. (2002). *Guía para la presentación de la Manifestación de Impacto Ambiental Minero. Modalidad: Particular*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/121006/Guia_MIA-Particular_Minero.pdf
- NOM-141, (2004) (testimony of SEMARNAT). https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=661988&fecha=13/09/2004
- NOM-155, (2007) (testimony of SEMARNAT). http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5128126&fecha=15/01/2010
- NOM-159, (2011) (testimony of SEMARNAT). <http://dof.gob.mx/normasOficiales/4644/semarnat/semarnat.htm>
- SGM. (2020). *Anuario Estadístico de la Minería Mexicana 2019* (2020th ed.). Servicio Geológico Mexicano. http://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2019_Edicion_2020.pdf
- SGM. (2021a). *Anuario Estadístico de la Minería Mexicana, 2020*. https://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2020_Edicion_2021.pdf
- SGM. (2021b). *Prontuario Estadístico: industria minera*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/682940/Pront_Jun_2021.pdf

- Shi, Z., Fan, D., Johnson, R. L., Tratnyek, P. G., Nurmi, J. T., Wu, Y., & Williams, K. H. (2015). Methods for characterizing the fate and effects of nano zerovalent iron during groundwater remediation. In *Journal of Contaminant Hydrology* (Vol. 181, pp. 17–35). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2015.03.004>
- Thangadurai, D., Ahuja, V., & Sangeetha, J. (2021). Nanomaterials and Nanoprocesses for the Removal and Reuse of Heavy Metals. In O. V. Kharissova et al. (Ed.), *Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications* (pp. 2649–2660). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36268-3_73
- Tsuzuki, T. (2009). Commercial scale production of inorganic nanoparticles. *International Journal of Nanotechnology*, 6(5/6), 567-. <https://doi.org/10.1504/IJNT.2009.024647>
- Wang, Y., Fang, Z., Kang, Y., & Tsang, E. P. (2014). Immobilization and phytotoxicity of chromium in contaminated soil remediated by CMC-stabilized nZVI. *Journal of Hazardous Materials*, 275, 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.04.056>
- Ye, S., Zeng, G., Wu, H., Zhang, C., Dai, J., Liang, J., Yu, J., Ren, X., Yi, H., Cheng, M., & Zhang, C. (2017). Biological technologies for the remediation of co-contaminated soil. In *Critical Reviews in Biotechnology* (Vol. 37, Issue 8, pp. 1062–1076). Taylor and Francis Ltd.
<https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1304357>
- Zhang, M. Y., Wang, Y., Zhao, D. Y., & Pan, G. (2010). Immobilization of arsenic in soils by stabilized nanoscale zero-valent iron, iron sulfide (FeS), and magnetite (Fe₃O₄) particles. *Chinese Science Bulletin*, 55(4), 365–372. <https://doi.org/10.1007/s11434-009-0703-4>