



Año 22 | Número 43 | 30 de junio 2025 |

| Hermosillo, Sonora, México. |

NUESTRA TIERRA

Órgano de divulgación de la Estación

Regional del Noroeste, UNAM



» **¿QUÉ NOS PUEDE DECIR EL POLEN FÓSIL ACERCA DEL ANTROPOCENO?**

» **LA BAHÍA DE ACAPULCO: ¿UN LUGAR PARA DISFRUTAR LA PLAYA Y COMER OSTRAS, O UN LABORATORIO NATURAL PARA ESTUDIAR LA CONTAMINACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS MARINOS?**

» **LAS APARIENCIAS ENGAÑAN, IMPORTANCIA DE LA GEODISPONIBILIDAD DE LOS METALES PESADOS EN LODOS RESIDUALES**

» **BATERÍAS DE LITIO: PERSPECTIVAS HACIA UN FUTURO SOSTENIBLE**

CONTENIDO

2 › Editorial

3 › ¿Qué nos puede decir el polen fósil acerca del Antropoceno?

7 › La Bahía de Acapulco: ¿Un lugar para disfrutar la playa y comer ostras, o un laboratorio natural para estudiar la contaminación de los ecosistemas marinos?

11 › Las apariencias engañan, importancia de la geodisponibilidad de los metales pesados en lodos residuales

16 › Baterías de Litio: Perspectivas hacia un futuro sostenible

Ilustración de portada: Composición Freepik.



f @RNTERNOUNAM

t @RNTERNO

El contenido de los artículos es responsabilidad de los autores y no refleja necesariamente el punto de vista del Comité editorial, ni de la UNAM. Se autoriza la reproducción de los artículos (no así de las imágenes) siempre y cuando se cite la fuente y se respeten los derechos de autor.

Nuestra Tierra, Año 22, No. 43 (Junio de 2025), es una publicación semestral del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C. P. 04510, Ciudad de México. Estación Regional del Noroeste, av. Luis Donaldo Colosio s/n y Madrid, campus UniSon, Hermosillo, Sonora, C. P. 83000. Editora responsable: Blanca González M. Número del Certificado de Reserva de Derechos al uso exclusivo del Título: 04-2004- 050610455400-102. ISSN 1665-935X. Número del Certificado de Licitud de Título y Contenido: 17529. Diseño: Alejandra Bárcenas Martínez. Impresión: Imagen Digital. Tiraje: 120 ejemplares, impresión Offset con papel couché cover de 300 g para forros y couché text de 150 g para los interiores.

EDITORIAL

El ambiente lleva escrita nuestra historia. No en palabras, sino en las huellas que dejamos en la naturaleza. Cada transformación del paisaje, cada alteración de un ecosistema o cada residuo acumulado es un testimonio silencioso de nuestra presencia.

En este número, Galaz y colaboradores nos plantean la pregunta ¿Qué nos puede decir el polen acerca del Antropoceno? A través del análisis del polen fósil, veremos cómo es posible identificar con gran precisión los efectos de la actividad humana en los ecosistemas en las últimas décadas. Desde la extinción de especies y la introducción de otras, hasta los cambios de uso de suelo y el impacto del cambio climático, el polen revela cómo las plantas han respondido a presiones inéditas. Así, el registro polínico no solo reconstruye el pasado, también ofrece evidencia concreta en la discusión del Antropoceno, una era marcada por la profunda huella humana en la naturaleza.

Otra de esas huellas se encuentra en La Bahía de Acapulco: ¿Un lugar para disfrutar la playa y comer ostras, o un laboratorio natural para estudiar la contaminación de los ecosistemas marinos? Salgado y colaboradores nos muestran cómo las descargas directas de aguas residuales sin tratamiento han llevado a la acumulación de elementos potencialmente tóxicos (EPT), como plomo y cadmio, en ostras locales muy consumidas. Esta situación plantea un riesgo a la salud que no podemos ignorar, pero también una oportunidad para repensar nuestras prácticas urbanas y costeras.

Y cuando esas aguas residuales sí se tratan, emergen nuevos retos: los lodos residuales. Aunque ricos en nutrientes y con potencial para convertirse en abonos orgánicos, también contienen EPT que pueden movilizarse fácilmente en el ambiente. En el artículo Las apariencias engañan, importancia de la geodisponibilidad de los metales pesados en lodos residuales, López y colaboradores, muestran que el verdadero problema no es solo cuántos metales hay, sino qué tan fácil es que entren en contacto con el suelo, el agua y los organismos vivos. Ante esta realidad, las regulaciones actuales resultan insuficientes.

Finalmente, pensando en un futuro eléctrico y conectado, las baterías de litio representan una promesa de transformación energética. En Baterías de Litio: Perspectivas hacia un futuro sostenible, Barbosa y su equipo, nos recuerdan que la innovación no solo debe enfocarse en la producción, sino también en el uso responsable, la reutilización y el reciclaje de las baterías. Si actuamos con responsabilidad, podemos evitar que se conviertan en un nuevo tipo de residuo y limitar la expansión de nuestra huella en el futuro próximo.

Esperamos que estas páginas te inviten a reflexionar: cada huella que dejamos en el ambiente es un rastro del presente que leerán las generaciones futuras. ¿Qué historia queremos que cuente?

Blanca González M.

DIRECTORIO UNAM

LEONARDO LOMELÍ VANEGAS
Rector

PATRICIA DOLORES DÁVILA ARANDA
Secretario General

TOMÁS HUMBERTO RUBIO PÉREZ
Secretario Administrativo

HUGO ALEJANDRO CONCHA CANTÚ
Abogado General

MARÍA SOLEDAD FUNES ARGÜELLO
Coordinadora de la Investigación Científica

RICARDO BARRAGÁN MANZO
Director del Instituto de Geología

THIERRY CALMUS
Jefe de la Estación Regional del Noroeste

DIRECTORIO DE NUESTRA TIERRA

Editora responsable
BLANCA GONZÁLEZ MÉNDEZ
Secihti, ERNO, Instituto de Geología, UNAM

Editoras asociadas
ADRIANA AIMÉ ORCÍ ROMERO
ERNO, Instituto de Geología, UNAM

CLARA L. TINOCO OJANGUREN
ERNO, Instituto de Ecología, UNAM

DENISSE ARCHUNDIA PERALTA
Secihti, Instituto de Geología, UNAM

AURORA M. PAT ESPADAS
Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, UNISON

MA. CRISTINA PEÑALBA GARMENDIA, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, UNISON

Para recibir esta revista vía correo escribir a:
nuestratierra@geologia.unam.mx

¿QUÉ NOS PUEDE DECIR EL POLEN FÓSIL ACERCA DEL ANTROPOCENO?

Carlos A. Galaz-Samaniego^{1*}, M. Cristina Peñalba¹ y Alejandro Cearreta²

¹Universidad de Sonora, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Av. Luis Donaldo Colosio s/n, Edificio 7G, Col. Centro, Hermosillo, Sonora 83000

²Universidad del País Vasco UPV/EHU, Departamento de Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Barrio Sarriena s/n, 48940 Leioa, España.

*carlos.galaz@unison.mx



Figura 1. Detalle de un estrato consolidado de origen natural pero formado por materiales antrópicos (beachrock) ubicado en la playa Tunelboca, en el término municipal de Getxo, País Vasco, donde es posible la identificación de ladrillos refractarios, escorias de fundición, fragmentos de vidrio y otros materiales de construcción provenientes de la industria local del hierro y vertidos originalmente en mar abierto entre los años 1902 y 1966. Fuente: Imagen del autor.

Introducción

Las actividades humanas, cada vez más intensas y extendidas a gran parte de la superficie del planeta, han dado lugar a un término geológico que se discute en la actualidad: el **Antropoceno**, intervalo de tiempo identificado por la acción antrópica (causada por el ser humano) y su carácter modificador, incluso del registro geológico (Figura 1). Para su caracterización, la comunidad científica ha respondido con la generación de un monitoreo exhaustivo y la publicación de análisis detallados de las variaciones ambientales, atmosféricas, hidrológicas, biológicas y geológicas experimentadas en las últimas décadas.

Evidencias del Antropoceno (Syvitski et al., 2020):

- La composición química de la atmósfera y los sedimentos fue modificada debido a la presencia de elementos radioactivos nuevos a partir del comienzo de los ensayos termonucleares.
- La producción de plásticos ha crecido exponencialmente en las últimas décadas y la presencia de plásticos (y microplásticos) en los sedimentos delimita estratigráficamente este intervalo temporal.
- Los niveles de CO₂, CH₄, y otros gases de efecto invernadero alcanzan valores nunca registrados en la historia humana, provocando un rápido aumento en la temperatura global y un cambio climático innegable.
- Cientos de contaminantes antropogénicos y compuestos farmacéuticos fueron liberados al ambiente, ocasionando el deterioro de los ecosistemas y la mortandad de miles de organismos.
- El crecimiento poblacional humano y de los animales domésticos alcanza el 97% de la biomasa de mamíferos terrestres.

El avance en el entendimiento del sistema terrestre en todas sus facetas y el desarrollo de herramientas analíticas y computacionales más precisas han permitido comprender y descifrar de mejor manera la dinámica y los efectos de esas modificaciones antrópicas en las poblaciones biológicas y en el paisaje. A pesar de esto, los registros instrumentales y los archivos históricos tienen una limitación temporal y espacial, y solo conociendo el estado del planeta en tiempos más remotos podríamos entender la magnitud de la variación experimentada en respuesta a las actividades recientes del ser humano.

Para ello, es necesario recurrir a los denominados “proxies”, indicadores indirectos de los paleoclimas y paleoambientes registrados en diversos materiales de la naturaleza, los cuales son interpretados o calibrados a través de su comparación con ejemplos (análogos) actuales. Esta comparación es posible debido al Principio del Uniformismo que asume que los procesos naturales que operan en la actualidad responden a las mismas bases físicas y químicas que los ocurridos en el pasado.

¿Dónde se almacena toda esta información?

El impacto generado por los humanos a los ecosistemas, el cambio climático y algunos procesos naturales como la sucesión ecológica generan cambios tan fuertes en el ambiente que dejan su evidencia en el registro sedimentario, la cual puede almacenarse directa o indirectamente en los medios de depósito (áreas de la superficie terrestre donde es posible la acumulación de sedimentos).

El clima es uno de los principales condicionantes que regulan los procesos sedimentarios. A pesar de que las condiciones climáticas actuales son diferentes a las que se presentaron en el tiempo geológico pasado, ya sea en intensidad o frecuencia, los parámetros fundamentales como la temperatura, la precipitación o los vientos son los mismos. Estos factores regulan el aporte de sedimentos al controlar las tasas de meteorización y erosión de las rocas, las condiciones de transporte de los sedimentos y los mecanismos de deposición (Arche, 2010).

Las fuentes de información o “proxies” pueden incluir:

- 1) Partículas que conforman los depósitos sedimentarios o paleosuelos (litología/mineralogía) que reflejan las condiciones climáticas o ambientales bajo las cuales se formaron.
- 2) Indicadores geoquímicos, proxies que incluyen distintos elementos químicos, razones isotópicas, elementos químicos traza y moléculas orgánicas, contenidos en los sedimentos.
- 3) Evidencias paleontológicas, fósiles de plantas, animales o de cualquier organismo, que brindan información ambiental del lugar que habitaron.

Los medios sedimentarios son un reflejo de las condiciones en las que se desarrollan. Se identifican tres grandes grupos:

1) Los medios o ambientes sedimentarios continentales destacables son: los medios aluviales, fluviales y lacustres; 2) en los medios costeros se diferencian: los deltas, las llanuras de inundación y los estuarios; y 3) los medios marinos: los pelágicos (aguas abiertas de menor o mayor profundidad), los cuales reciben el mayor aporte de sedimentos.

Algunos medios sedimentarios son más propicios para la preservación de determinados proxies. Tal es el caso de los medios sedimentarios anóxicos y con pH ácido que favorecen la conservación de ciertos grupos de fósiles, que al estar expuestos a poco oxígeno y a escasa actividad microbiana pueden permanecer inalterados por tiempo indefinido. Un ejemplo de fósiles que se pueden conservar en estos medios pueden ser los granos de polen y las esporas de helechos y musgos, los cuales pueden funcionar como fuentes de información indirecta de las condiciones ambientales, los tipos de vegetación y los cambios en la diversidad y abundancia de un lugar específico.

¿Por qué el polen puede ser fuente de información?

La Palinología es una disciplina botánica que se dedica al estudio de los granos de polen, así como de esporas (helechos, hongos y musgos), quistes de algas y otros palinomorfos microscópicos actuales y fósiles (como dinoflagelados, acritarcos, o quitinozoos). El término fue introducido por Hayde y Williams en 1944 y proviene etimológicamente del griego “paluno” que significa desparramar, esparcir y “logos” tratado o estudio. Esta disciplina científica está relacionada con la estructura y formación de los granos de polen y esporas y también con su dispersión y preservación bajo ciertas condiciones ambientales.

Los granos de polen son producidos en las anteras de las flores masculinas de las angiospermas y en los estróbilos de las gimnospermas y su función es transferir el material genético a las estructuras sexuales femeninas para el efecto de la fecundación y la producción de las semillas. La mayoría de los granos de polen son extremadamente pequeños; pocos exceden 80 a 100 μm de diámetro, con la mayoría dentro del rango de los 25 a 35 μm (Moore et al., 1994).

El grano de polen tiene una pared formada por dos capas: la exterior es llamada exina y está constituida de un polímero conocido como **esporopolenina**; este compuesto de origen orgánico es probablemente uno de los materiales más resistentes encontrados en muestras biológicas y geológicas. La función principal de estas capas es proteger al gametofito joven de la desecación y del ataque microbiológico, pero también tiene el efecto de preservar los granos de polen en los sedimentos cuando todos los demás constituyentes orgánicos son reducidos a sus componentes estructurales (Figura 2). La capa interior o intina está constituida de

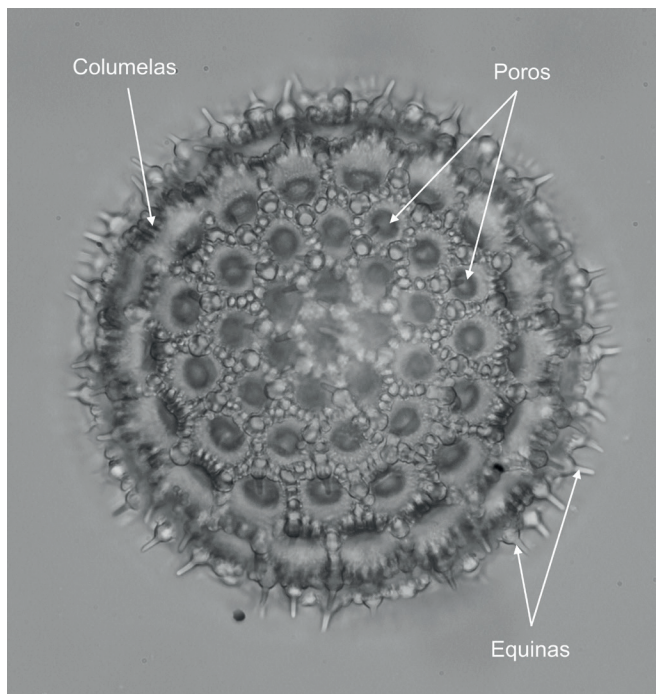


Figura 2. Micrografía de polen de *Ipomoea ternifolia* al microscopio óptico convencional. La imagen muestra, en la zona externa enfocada, el detalle de la ornamentación del grano de polen y las distintas aberturas germinales (poros) que permiten su identificación y asignación taxonómica. Fuente: Imagen del autor.

celulosa y es muy similar a la pared de la célula vegetal aunque no se preserva en el registro geológico.

La exina presenta una gran variedad de características morfológicas y estructurales que, sumadas al número y distribución de las aberturas germinales (adelgazamientos de la pared celular del grano de polen que favorecen la ruptura de la célula y facilita la formación de un tubo polínico), al tamaño y a la forma del grano, brindan la base de la identificación de los granos de polen. Cada especie de planta tiene un tipo de grano de polen particular, que se puede identificar al microscopio óptico convencional o al microscopio electrónico.

En conjunto todas estas características permiten **utilizar a los granos de polen como huellas digitales de sus plantas productoras** y comprender así los ambientes en los que se desarrollan, siendo ésta la base del análisis polínico de alta resolución.

La huella humana en el ambiente: la palinología como herramienta de investigación

Uno de los objetos de estudio de la palinología son los granos de polen fósil siendo, hoy en día, uno de los métodos más importantes en la reconstrucción de la paleoflora, la vegetación y los ambientes del pasado.

La utilización de esta herramienta contempla y busca entender la influencia que tienen el clima, el suelo, la biodiversidad y las actividades humanas en los patrones de distribución de las plantas en el espacio y a través del tiempo, además de sus respuestas ante distintos estímulos. En un origen, el análisis polínico buscaba comprender cómo las poblaciones respondían de manera natural a las variaciones ambientales relacionadas con el cambio climático. Sin embargo, hay otros factores determinantes que modifican fuertemente la dinámica poblacional, como son las actividades humanas asociadas al desarrollo económico y al crecimiento demográfico.

En los últimos siglos de la historia moderna, y en específico el intervalo temporal (1950 a la actualidad) que cubre el Antropoceno (Steffen et al. 2016), los seres humanos hemos generado un sinnúmero de modificaciones al sistema natural, desde la extirpación de especies nativas y la introducción de algunas alóctonas, los cambios de uso de suelo, la explotación desmedida de los recursos naturales, la domesticación de especies animales y vegetales, hasta incluso la extinción de especies (Figura 3). Esto ha generado que las plantas adaptadas a ciertos ambientes sufran presiones nunca experimentadas previamente que las llevan al declive de sus poblaciones, mismo que se refleja en la disminución del polen.

La utilización del análisis polínico de alta resolución en secuencias temporales cortas (últimos siglos o décadas) brinda la posibilidad de analizar, desde la perspectiva palinológica y más allá del registro instrumental, las modificaciones de las poblaciones vegetales ante estas presiones antropogénicas, permite detectar la huella humana en el registro sedimentario y evaluar la tasa de cambio en la estructura y dinámica poblacional. La información que provee el polen es esencial para la restauración de los ecosistemas y para definir las estrategias más adecuadas para su conservación.

Perspectivas a futuro

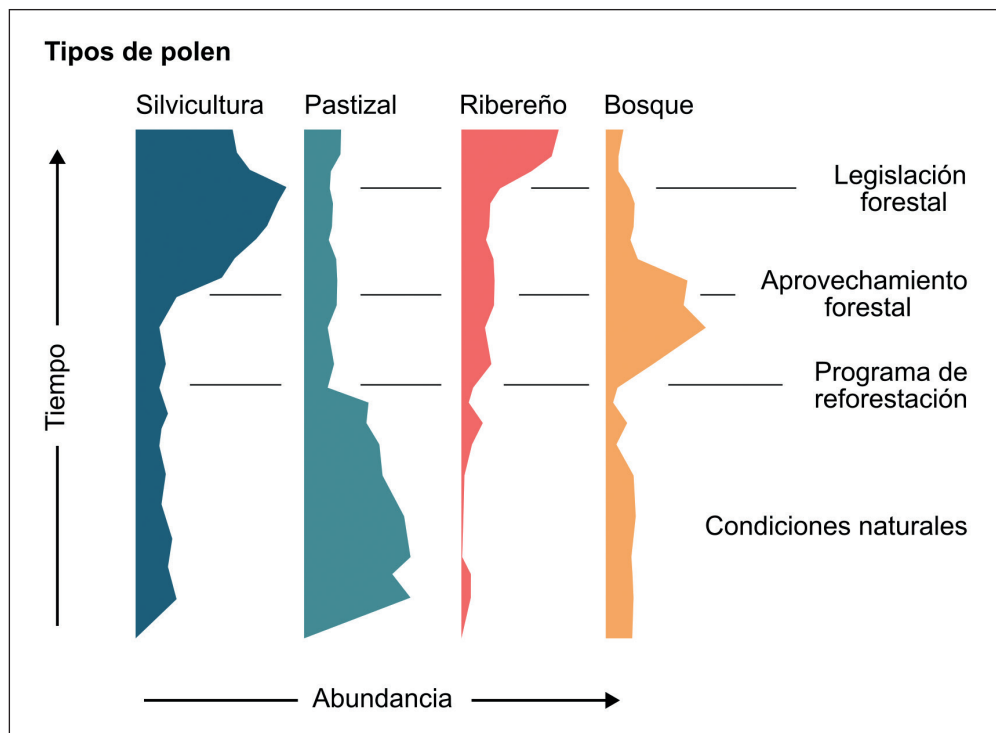
A pesar de que aún son escasos los estudios polínicos de sedimentos del Antropoceno, la utilización de esta herramienta puede ser valiosa para evaluar políticas ambientales relacionadas con la conservación y el manejo de las poblaciones vegetales, los efectos del aumento de la temperatura relacionados al cambio climático global y el impacto directo que tienen las actividades antropogénicas sobre las poblaciones de plantas (Figura 4).

En los últimos años se está reforzando la colaboración entre las perspectivas ecológica y paleoecológica para alcanzar a conocer más profundamente los ecosistemas y contribuir a mitigar los efectos de los cambios climático y antrópico.

El análisis polínico de alta resolución consiste en un tipo de estudio paleoecológico basado en la determinación taxonómica del polen con la más alta precisión posible y la utilización de modelos cronológicos muy precisos, que permiten el análisis detallado de las secuencias sedimentarias a escalas de años o decenas de años.



Figura 3. Imagen aérea de alta resolución de la región noroeste de la Península Ibérica (Galicia, España) proveniente de Google Earth. La imagen muestra un área con un intenso cambio de uso de suelo: una región cubierta por grandes extensiones de terreno aprovechado para fines agrícolas y forestales y la fragmentación de los ecosistemas ocasionada por la apertura desmedida de caminos y la construcción de núcleos de población. Fuente: Imagen del autor.



Referencias

- Arche, A., 2010, Sedimentología: del proceso físico a la cuenca sedimentaria: Madrid, España, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1288 pp.
- Moore, P. D., Collinson, M., Webb, J. A., 1994, Pollen Analysis: Wiley, 216 pp.
- Steffen, W., Leinfelder R., Zalasiewicz J., Waters C. N., Williams M., Summerhayes C., Barnosky A. D., et al., 2016, Stratigraphic and Earth System Approaches to Defining the Anthropocene: Earth's Future 4, 8, 324-45
- Syvitski, J., Waters C. N., Day J., Milliman J. D., Summerhayes C., Steffen W., Zalasiewicz J., et al. 2020, Extraordinary Human Energy Consumption and Resultant Geological Impacts Beginning around 1950 CE Initiated the Proposed Anthropocene Epoch: Communications Earth & Environment 1, 32.

Figura 4. Diagrama polínico esquemático de distintos grupos de polen que muestra el efecto (a lo largo del tiempo) que tiene la implementación de un programa de reforestación, el aprovechamiento de recursos naturales y la legislación en materia forestal sobre las abundancias de los distintos taxa.

Figuras elaboradas por C.A. Galaz Samaniego.

LA BAHÍA DE ACAPULCO: ¿UN LUGAR PARA DISFRUTAR LA PLAYA Y COMER OSTRAS, O UN LABORATORIO NATURAL PARA ESTUDIAR LA CONTAMINACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS MARINOS?

Sergio Adrián Salgado Souto^{1}, José Eduardo Chong López², Rafael Del Río Salas³ y Oscar Talavera Mendoza¹*

¹Escuela Superior de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Guerrero, Ex-Hacienda San Juan Bautista s/n, Taxco el Viejo, Guerrero, México, C.P. 40323

²Maestría en Recursos Naturales y Ecología, Facultad de Ecología Marina, Universidad Autónoma de Guerrero, Gran Vía Tropical 20, fraccionamiento Las Playas, Acapulco de Juárez, Guerrero, México, C.P. 39390

³Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Colosio y Madrid, s/n, Hermosillo, Sonora, México, C.P. 83000

*sergiosalgado@uagro.mx

¿Qué es la contaminación y por qué se contaminan los océanos?

La contaminación se presenta en el ambiente cuando en el agua, aire o suelo existen sustancias nocivas o elementos químicos que provocan daño a los seres vivos o al mismo medio ambiente. En la naturaleza se pueden encontrar muchos de los elementos químicos de la tabla periódica, incluso aquellos que son muy tóxicos (p.ej. plomo, arsénico, mercurio), pero se encuentran en concentraciones o cantidades tan bajas que no generan afectación alguna a los seres vivos. Sin embargo, cuando la concentración de alguno de ellos excede los valores de fondo (valores naturales en rocas y suelos) o las referencias ambientales (valores establecidos por agencias gubernamentales u organizaciones; p.ej. Pb y Cd 0.3 y 2.0 mg/kg respectivamente; Codex, 2010), puede existir contaminación ambiental y un daño potencial a la salud.

Si bien la mayoría de los seres vivos requieren de elementos químicos para realizar las funciones fisiológicas esenciales (p.ej. nitrógeno (N), carbono (Ca), hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), aluminio (Al), etc.), cuando los elementos están en exceso pueden ser nocivos para los organismos, causando un sinnúmero de daños a la salud. Los elementos químicos que pueden causar daños nocivos al medio ambiente y a la salud dependiendo de su concentración, se conocen como **elementos potencialmente tóxicos (EPT)**.

En el caso de los océanos, la contaminación degrada el ambiente marino y se refleja en el agotamiento de los recursos naturales y en la calidad de agua. Lo anterior tiene repercusiones en el fondo de los océanos, donde se desarrolla vida (sustrato marino), generando el riesgo de destruir ecosistemas y la vida silvestre. La contaminación en zonas costeras está asociada principalmente a las actividades humanas, tales como turismo, fugas de combustible y aceite, combustión de hidrocarburos, residuos urbanos e industriales, entre otras. Estas actividades son más comunes en aquellas regiones con un notable desarrollo turístico o industrial. No obstante, la contaminación, ya sea la generada en las costas o en el interior de los continentes, llega a los océanos como destino final,

provocando efectos nocivos en los ecosistemas, los cuales son cada vez más evidentes, más peligrosos y acelerados. El efecto contaminante tarde o temprano impacta a la salud y el bienestar de los seres humanos.

¿EPT y bivalvos?

La urbanización, industrialización, minería, agricultura y derrames de aguas residuales son actividades antropogénicas que favorecen la liberación y dispersión de EPT y contribuyen con contaminantes a los océanos. Algunos EPT tienen una naturaleza no biodegradable, alta persistencia en la naturaleza, alta toxicidad, gran capacidad de acumularse gradualmente en organismos (bioacumulación), aumentando su concentración y transferencia en la cadena alimentaria (biomagnificación). Por lo tanto, los EPT en el medio ambiente pueden ser absorbidos por organismos e incorporados a sus tejidos, provocando daños a los humanos cuando son consumidos (p.ej. peces y moluscos).

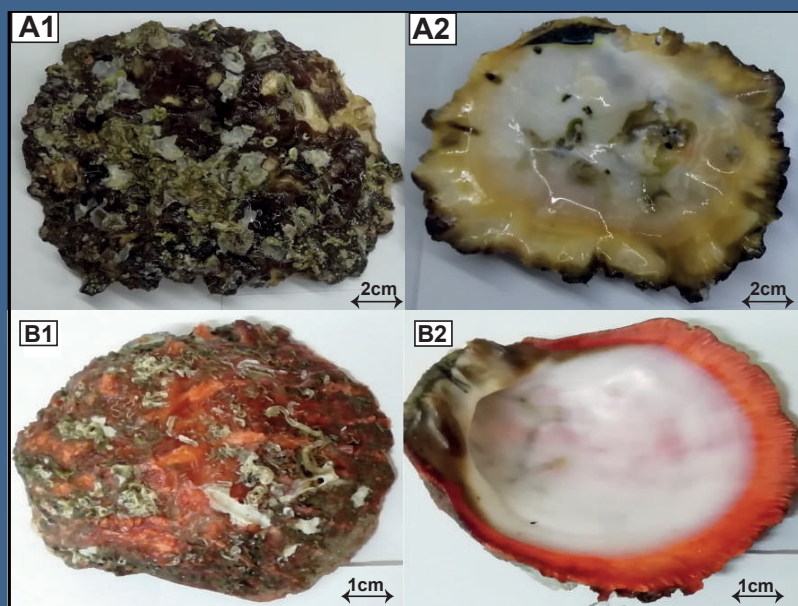


Figura 1. Morfología de los organismos de dos especies de bivalvos *Hyotissa hyotis* (A1 y A2) y *Spondylus limbatus* (B1 y B2) ampliamente consumidas en la Bahía de Acapulco México, estudiados por Chong-López (2023). A1 y B1 son la imagen externa de las valvas, mientras A2 y B2 son la imagen interna. Fuente: Imagen del autor.

Los bivalvos son organismos muy apreciados y degustados por su sabor y alto contenido nutrimental. Su alta demanda hace que los pescadores recolecten diariamente grandes cantidades para comercializarlos desde puestos ambulantes o a través de la industria restaurantera.

Estos moluscos permanecen adheridos a las rocas o a los sedimentos casi toda su vida y filtran el agua de mar para alimentarse de organismos microscópicos llamados fitoplancton y zooplancton. De esta manera, a través de la filtración del agua de mar, los bivalvos, además de obtener su alimento, también absorben sustancias tóxicas y contaminantes presentes en el agua marina, acumulándolas en sus tejidos y volviendo el consumo de estos organismos peligroso para la salud humana. No obstante, esta característica hace que los bivalvos sean útiles para monitorear contaminación (bioindicadores) de los océanos, convirtiéndolos en una herramienta poderosa, precisa y útil para el estudio de la contaminación del medio ambiente (Fig. 1).

En la cadena trófica, los organismos más pequeños son consumidos por organismos

de tamaño mayor. De tal manera, un organismo pequeño es el alimento de uno mediano, y este a su vez es el alimento de uno más grande. Todos los organismos marinos tienen la peculiaridad de acumular EPT en sus tejidos. Desafortunadamente, la acumulación de EPT es directamente proporcional a su tamaño. Es decir, los organismos de mayor tamaño bioacumulan y biomagnifican mayor cantidad de EPT, que los de tamaño menor.

Debido a que los bivalvos sirven como alimento para otros organismos, incluidos los humanos, la ingesta de bivalvos contribuye con la transferencia de EPT a través de la cadena alimentaria, representando una exposición continua y prolongada (exposición crónica) o breve con concentraciones altas de EPT, por ejemplo, plomo y cadmio (exposición aguda).

Los bivalvos en general son una fuente rica en elementos como el calcio (Ca), fósforo (P), potasio (K), zinc (Zn), hierro (Fe), entre otros. Estos elementos son indispensables

en nuestra dieta para tener un buen funcionamiento del metabolismo. Sin embargo, existen elementos que no juegan ningún papel metabólico en nuestro organismo como el arsénico (As), mercurio (Hg), cadmio (Cd), talio (Tl) y plomo (Pb), y se les conoce como tóxicos. A pesar de que los bivalvos pueden contener elementos dañinos para la salud humana, se pueden consumir sin que representen un daño a nuestra salud, siempre y cuando no sea muy seguido ni en altas cantidades.

La Bahía de Acapulco: ¿un laboratorio natural?

La Bahía de Acapulco, ubicada en el Pacífico sur de México, en el municipio de Acapulco de Juárez, Guerrero, es uno de los sitios turísticos más emblemáticos de México. Este destino turístico cuenta con infraestructura hotelera importante, además de un puerto naval militar, terminal de cruceros internacionales, club náutico y barcos de pesca. La Bahía de Acapulco tiene una longitud de ~6 km, y una amplitud de ~6 km, y un clima tropical húmedo con temperaturas entre 23 y 36 °C y tormentas tropicales en verano.

A pesar de que la actividad económica de Acapulco ha propiciado el incremento de su población, no cuenta con la infraestructura para tratar la descarga de aguas residuales hacia el océano (Figs. 2 y 3). Estudios científicos indican que algunas playas de la Bahía de Acapulco exceden los niveles de bacterias y contaminantes recomendados para aguas costeras recreativas (Jonathan et al., 2011). Teniendo en cuenta que los bivalvos bioacumulan EPT, Chong-López (2023) realizó un estudio y analizó dos especies de bivalvos recolectados en cuatro sitios, tres dentro de la bahía y uno más por fuera de esta, en un lugar cercano a una planta tratadora de aguas residuales. En esa planta tratadora se deberían de eliminar la mayor cantidad de contaminantes para reducir el impacto para el océano. Desafortunadamente, con frecuencia y solo en ese punto, se vierten al océano cientos de metros cúbicos de aguas negras sin tratar. Peor aún, en la Bahía de Acapulco existen por lo menos otras cuatro zonas donde también se vierten aguas negras al mar sin ningún tratamiento, a las cuales se les acumulan las descargas de los hoteles y restaurantes instalados a lo largo de la costa de toda la Bahía de Acapulco (Fig. 2).

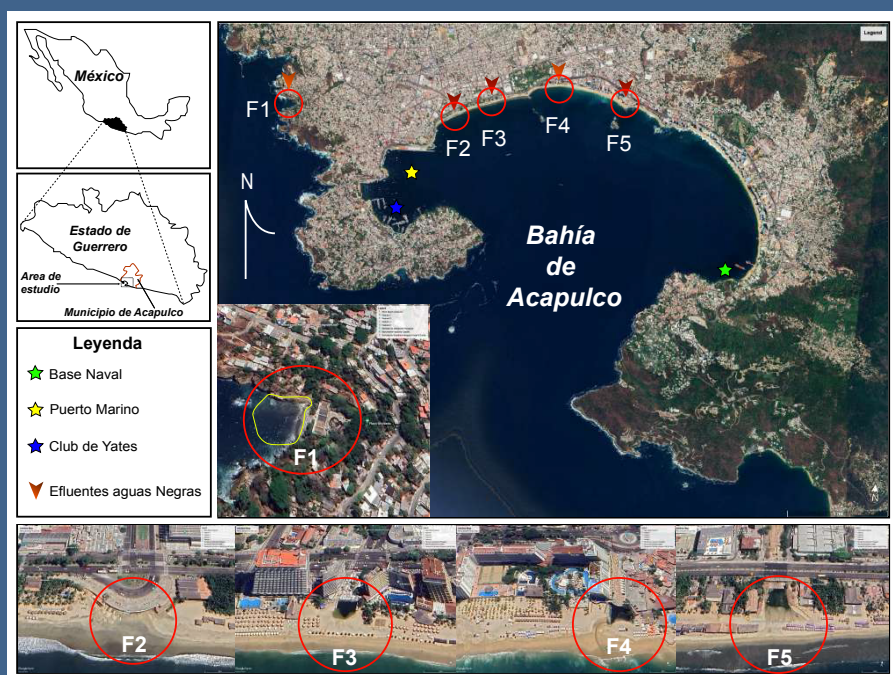


Figura 2. Mapa de la Bahía de Acapulco, estado de Guerrero, en el sur de México, donde se observan cuatro efluentes de aguas negras que desembocan directamente a la bahía (F2-F5) y uno más fuera de esta (F1) en la planta tratadora de aguas negras de funcionamiento intermitente, donde se aprecia el color gris de la descarga de aguas negras. Se utilizaron imágenes de Google Earth Pro, versión: 7.3.6.9345.

Las dos especies de bivalvos analizadas por Chong-López (2023) (16 organismos por especie) son de las más abundantes y altamente demandadas por los comensales que visitan dicho sitio turístico, lo que permitió evaluar concentraciones de EPT en bivalvos y riesgo a la salud por su consumo. Las especies de bivalvos estudiadas se conocen localmente por los pescadores como “Garra de Tigre” y “Callo Margarita”, aunque sus nombres científicos son *Hyotissa hyotis* y *Spondylus limbatus*, respectivamente (Fig. 1).

En esa investigación se analizó el tejido comestible, el sistema digestivo y las conchas de cada organismo para determinar las concentraciones de EPT. Se encontró que elementos como el plomo (Pb), cadmio (Cd), cobalto (Co) y zinc (Zn) son los más abundantes en el tejido comestible. También se descubrió que, con tan solo consumir de dos a seis organismos, se ingieren cantidades de Pb y Cd suficientes para calificar como riesgo moderado de contraer en un futuro lejano algún tipo de cáncer, si es que estos alimentos se consumen en exceso y como parte de una dieta continua. Esto se debe a que en el tejido comestible de los organismos de la especie *Hyotissa hyotis* se acumula fácilmente Pb y Cd en los de la especie *Spondylus limbatus*, elementos que son considerados como cancerígenos. Sin embargo, es importante resaltar que el riesgo es solo para aquellas personas que acostumbran a consumir a menudo estos organismos y en grandes cantidades, por lo que, si una persona los consume ocasionalmente, no tiene nada de qué preocuparse.

También se calculó el factor de bioacumulación, un valor que indica la capacidad que tienen los organismos de acumular EPT en sus tejidos, como respuesta a las condiciones del medio ambiente en el que viven. Cuando el factor de bioacumulación es >1 significa que la concentración de cualquier EPT en el organismo es mayor que la del



Figura 3. Fotografías (A-B) del verano del 2022 donde se muestra la desembocadura de una de las descargas más importantes en la que se vertieron miles de metros cúbicos de aguas negras a la Bahía de Acapulco. Incluso la prensa nacional dio la noticia por lo grave de aquel lamentable suceso. Las fotografías C y D muestran el mismo lugar en condiciones cotidianas. Fuente: Imagen del autor.

sustrato. Tomando en cuenta que los valores calculados fueron entre 2 y 5 para Ni, entre 3 y 10 para Cd, entre 2 y 4 para el Pb, entre 1 y 11 para Co, y entre 1 y 130 para Zn, se puede afirmar que en la Bahía de Acapulco existen suministros suficientes de estos elementos (Fig. 4).

Los bivalvos estudiados también mostraron importantes habilidades para bioacumular EPT en el sistema digestivo, con 20 a 30% más que en el tejido comestible. Esta característica es normal ya que el sistema digestivo es el encargado de procesar el alimento y de distribuir los nutrientes a los diferentes órganos. Las conchas de estos organismos también mostraron importantes capacidades de bioacumulación, pero en elementos que no son muy trascendentales para el funcionamiento fisiológico de estos organismos, tales como el Pb, Cd, Co, etc. Finalmente, el estudio demostró que en la Bahía de Acapulco existen EPT en altas concentraciones que provienen de fuentes antropogénicas.

Implicaciones económicas, sociales y ambientales

Históricamente, Acapulco ha sido uno de los destinos turísticos más importantes de México, ya que año con año recibe grandes cantidades de turistas nacionales e internacionales. Recientemente, han sido más comunes las noticias que cuestionan la limpieza y sanidad de sus aguas, playas y sedimentos marinos (Jonathan et al., 2011; Bahena-Román et al., 2021), ya que se han detectado microorganismos patógenos (coliformes fecales y enterococos) y descargas de aguas negras directas al mar con EPT por arriba de lo recomendado. Esta situación, además de tener un impacto negativo en la imagen de este destino turístico, puede desencadenar una problemática de salud pública, ya que de la bahía y de las playas de los alrededores, diariamente se extraen grandes cantidades de productos marinos como peces y moluscos, los cuales son degustados por ciudadanos locales y turistas nacionales e internacionales

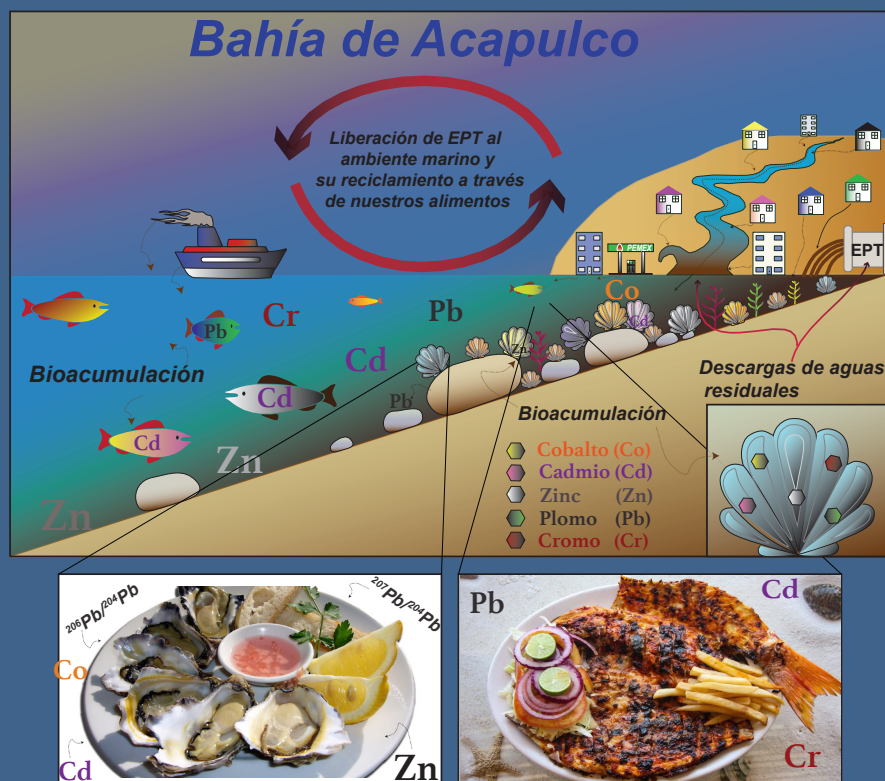


Figura 4. Resumen gráfico de la problemática que existe en la Bahía de Acapulco, donde se muestran las descargas de aguas residuales de la ciudad directamente a la bahía, así como también de las embarcaciones, casas, hoteles, etc. Esta figura hace referencia al reciclamiento de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) que son descargados de distintas fuentes, pero regresan a nosotros en la comida (mariscos) extraída del mar. Fuente: Imagen del autor.

(Fig. 4). Los hallazgos de Chong-López (2023) ponen de manifiesto un diagnóstico que identifica la contaminación por EPT en la Bahía de Acapulco, la cual es reflejada en los bivalvos que viven en el sustrato de sus playas (Fig. 4). Estudiar la contaminación marina es importante para que las autoridades tengan información y puedan implementar políticas públicas para reducir la dispersión de contaminantes a los océanos. Es importante mencionar que otros países empezaron con la fase diagnóstica hace más de 20 años y ya empiezan a tener resultados tangibles en la disminución de contaminantes en sus costas. En México y en especial en Acapulco, estamos todavía en la fase de diagnóstico; sin embargo, como dice el dicho: ¡nunca es tarde para empezar!

Referencias

- Bahena-Román, M.S., Talavera-Mendoza, O., García-Ibáñez, S., Sarmiento-Villagrana, A., Aguirre-Noyola, J.L., Salgado-Souto, S.A., Gómez-Espinoza, C., & Rosas-Guerrero, V. 2021. Source of detritus and toxic elements of seabed sediments from Acapulco Bay (southern Mexico) and their ecological risk. *Marine Pollution Bulletin*. 172, 112797.
- Chong-López J.E., 2023. Biodisponibilidad, evaluación de riesgo y fuentes de EPT en bivalvos de importancia comercial del emblemático puerto de Acapulco, México. Tesis. Universidad Autónoma de Guerrero.
- Jonathan, M. P., Roy, P. D., Thangadurai, N., Srinivasalu, S., Rodríguez-Espinoza, P. F., Sarkar, S. K., Lakshumanan, C., Navarrete-López, M., & Muñoz-Sevilla, N. P., 2011. Metal concentrations in water and sediments from tourist beaches of Acapulco, Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 62(4), 845-850.
- Codex, S. T. A. N. (2010). 193, 1995. Norma general para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos y piensos Codex stan, 193-1995.

LAS APARIENCIAS ENGAÑAN, IMPORTANCIA DE LA GEODISPONIBILIDAD DE LOS METALES PESADOS EN LODOS RESIDUALES

Jazmin Alaide López Díaz¹, Giovanni Hernández Flores^{2*}, Erik Yoel Carreto Morales³, Yam Zul Ernesto Ocampo Díaz⁴

¹Facultad de Ecología Marina, Universidad Autónoma de Guerrero, ²CONAHcyT - Escuela Superior de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Guerrero, ³Centro de Ciencias de Desarrollo Regional, Universidad Autónoma de Guerrero, ⁴Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

*ghernandez@conahcyt.mx; ghernandez@uagro.mx

Introducción

Los lodos residuales (LR) producidos en las plantas de tratamiento de aguas negras son el residuo más abundante generado durante el proceso de recuperación de la calidad del agua. Su elevado contenido de nutrientes permite proponerlos como mejoradores de la fertilidad del suelo o abonos orgánicos (López-Díaz y col., 2022). Desafortunadamente, además de los nutrientes, la posible presencia de contaminantes tóxicos, como metales pesados (MP), ha limitado una propuesta formal para usar a los LR de manera generalizada. La norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para el aprovechamiento y disposición final de los LR. Sin embargo, esta norma contempla la concentración total y no la concentración geodisponible. La concentración total de MP no es sinónimo de riesgo real, mientras que la concentración geodisponible sí representa un riesgo ambiental porque representa un elevado grado de facilidad de los MP para incorporarse al agua y convertirse en un riesgo real de contaminar el agua y el suelo, afectando la salud de los seres vivos.

Beneficios de las plantas de tratamiento de agua residual y generación de lodos residuales

El Sistema Nacional de Información del Agua (SINA, 2022) estima que en la actualidad se producen aproximadamente 8800 millones de m³ de agua residual en México. En algunos lugares de México, la escasez de agua ha provocado que algunos agricultores usen aguas negras para el riego de sus cultivos generando problemas de contaminación en suelo y en los productos cosechados. Con la finalidad de recuperar la calidad del agua y evitar la contaminación de ríos, arroyos, lagos, lagunas y cultivos, y para tener una fuente de agua de segunda necesidad se han desarrollado las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR); que hoy en día se contabilizan en 2872 en operación, distribuidas a lo largo del país. Las PTAR están reguladas por normas oficiales mexicanas y clasifican la calidad del agua que ahí se produce de acuerdo con tres diferentes

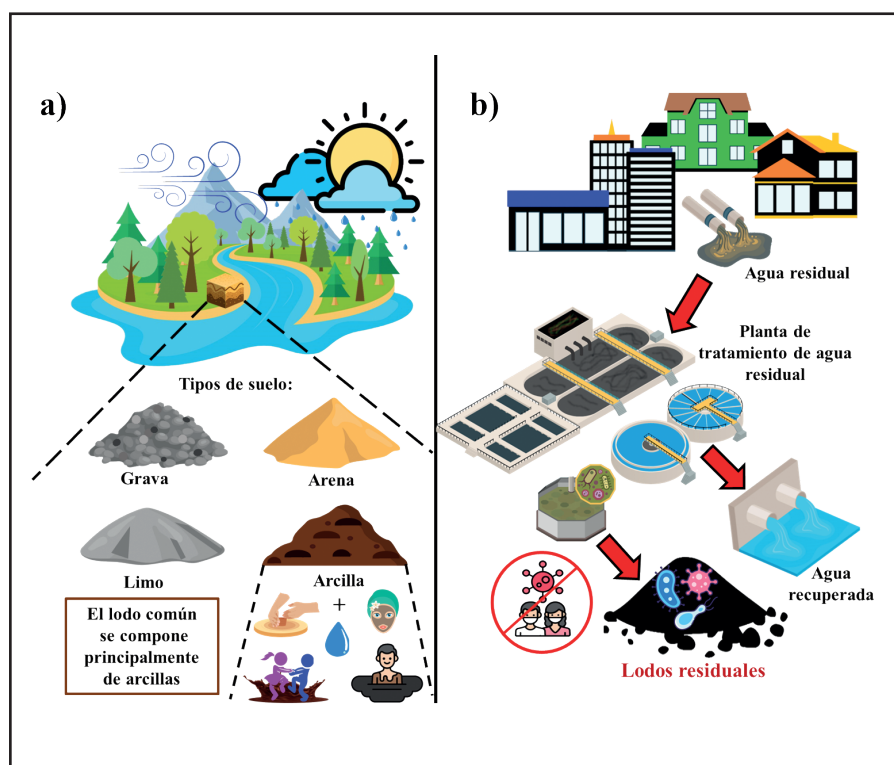


Figura 1. Diferencia entre a) lodos con los que jugamos en nuestra infancia y b) lodos que provienen de la descontaminación de las aguas negras con una elevada carga de microorganismos patógenos. Fuente: Imagen del autor.

normas: NOM-001-SEMARNAT-2021, NOM-002-SEMARNAT-1996 y NOM-003-ECOL-1997. En función de la calidad del agua que se genere estará el uso para el que pueda ser destinada el agua y reinsertada a algún proceso productivo (por ejemplo, riego de cultivos) o simplemente recreativo.

Desafortunadamente, como parte del proceso de tratamiento del agua residual se produce una elevada cantidad de *LR*. Los *LR* son de naturaleza diferente a los lodos que usualmente conocemos. Cuando escuchamos la palabra "lodo" la asociamos inmediatamente un tipo de suelo mezclado con una cierta cantidad de agua (Figura 1a). Mineralógicamente hablando, los lodos que comúnmente conocemos contienen un elevado contenido de arcillas (partículas diminutas de suelo generadas por el desgaste de un tipo especial de rocas que contienen minerales de silicio y aluminio, y que se unen fácilmente a moléculas de agua; a la mezcla comúnmente se le conoce como barro o lodo). Por otro lado, y para evitar la confusión, los *LR* de las *PTAR* tienen una definición establecida por la NOM-004-SEMARNAT-2002: *"son sólidos con un contenido variable de humedad, provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que no han sido sometidos a procesos de estabilización"*. A partir de aquí, cuando se hable de *LR* en este artículo, deberá pensarse en los lodos producidos por las *PTAR* y definidos por esta norma (Figura 1b). ¡Ojo! A diferencia de los lodos producidos por una mezcla de suelo con agua, los *LR* de una *PTAR* contienen una mayor cantidad de microorganismos causantes de infecciones y no se recomienda jugar o tener contacto directo con ellos hasta que no hayan sido tratados (Figura 1).

Para las *PTAR* la generación de *LR* es un verdadero dolor de cabeza. Por ejemplo, una *PTAR* pequeña, con capacidad para tratar 100 L de agua residual por segundo puede generar más de 2 toneladas de *LR* al día, es decir, más de 700 toneladas de *LR* al año. Esta cantidad de desechos hace que el manejo resulte muy complicado y costoso. Una propuesta para la disposición de los *LR* es la incineración. Esta acción es posible porque contienen una gran cantidad de carbono como parte de su composición, comúnmente conocido como materia orgánica. También se pueden dispersar en los suelos cercanos a las instalaciones de las *PTAR* o bien, usarlos para hacer composta o abonos orgánicos. La dispersión y el compostaje de *LR* son prácticas enfocadas en mejorar las características fisicoquímicas y microbiológicas de suelos erosionados o suelos de baja fertilidad. Su uso se ha reflejado en un aumento de la porosidad del suelo permitiendo el paso del agua y el aumento de los nutrientes debido a la gran cantidad de materia orgánica. En conjunto, aumentan la capacidad nutricional de los suelos.

Reportes en varias partes del mundo confirman que estas propuestas son ecológicamente amigables o sostenibles porque los *LR* contienen macronutrientes como: nitrógeno, fósforo y potasio; y micronutrientes como: calcio, hierro, magnesio, manganeso y zinc. Los macronutrientes se aplican comúnmente a los suelos agrícolas a través de los fertilizantes que se adquieren comercialmente para aumentar la productividad del suelo. Sin embargo, estos fertilizantes son una fuente de contaminación para el agua y el suelo, cuando se usan en exceso y no son aplicados adecuadamente. Además de los macro y micronutrientes, los *LR* presentan más del 80% de contenido de materia orgánica y microorganismos que contribuyen con la fertilidad del suelo y evitan la erosión o desgaste del suelo agrícola ocasionado por el uso de fertilizantes. Sin embargo, los *LR* podrían contener una diversidad de contaminantes que estaban en las aguas negras, agrupados como -elementos potencialmente tóxicos-, que convierte a los *LR* en peligrosos para la salud de los seres vivos que los ingieran o tengan contacto con ellos. Arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), plomo (Pb), níquel (Ni), mercurio (Hg) y zinc (Zn), son algunos de estos elementos potencialmente tóxicos que pertenecen al grupo de los *MP* y los podemos

encontrar en la naturaleza asociados a diferentes fracciones químicas. Estos ocho *MP* mencionados están considerados por la NOM-004-SEMARNAT-2002 para evaluar la calidad de los *LR* (López-Díaz y col., 2022). Existen otros *MP* que también pueden ser encontrados en los *LR*, pero no están considerados por la normatividad.

Fraccionamiento químico de los metales pesados

Para poder explicar en qué consiste la geodisponibilidad y hablar de fracciones químicas o fraccionamiento químico de los *MP* te invitamos a recordar el cuento infantil de "Los tres cerditos y el lobo feroz". Para empezar, ¿recuerdas el material con el que cada cerdito construyó su casa para protegerse de los poderosos soplidos del lobo? Exacto, los materiales fueron paja, madera y ladrillos. Lamentablemente, la casa de paja no resistió al primer soplido, mientras que la de madera resistió un poco más -algo así como dos soplidos-. En la casa construida con ladrillos, el lobo sopló y sopló, y volvió a soplar y nunca logró derribarla. En la naturaleza, los *MP* se encuentran distribuidos y -resguardados- en casas de diferentes materiales. Para identificar el "material de la casa" en que se encuentran resguardados los *MP*, se pueden aplicar diferentes metodologías conocidas como: procedimientos de extracción química secuencial (López Julián y Mandado Collado, 2002). Estas metodologías consisten en emplear diferentes condiciones fisicoquímicas que equivaldrían a -los soplidos del lobo-, generadas por el uso de compuestos químicos (disolventes) y diferentes condiciones de temperatura y presión para evaluar la facilidad con que pueden ser expuestos los *MP* presentes en suelo, sedimentos y materiales de desecho, por ejemplo, jales mineros.

Una de las metodologías más conocida es la propuesta por Tessier y colaboradores en 1979 (López Julián y Mandado Collado, 2002), quienes proponen una clasificación

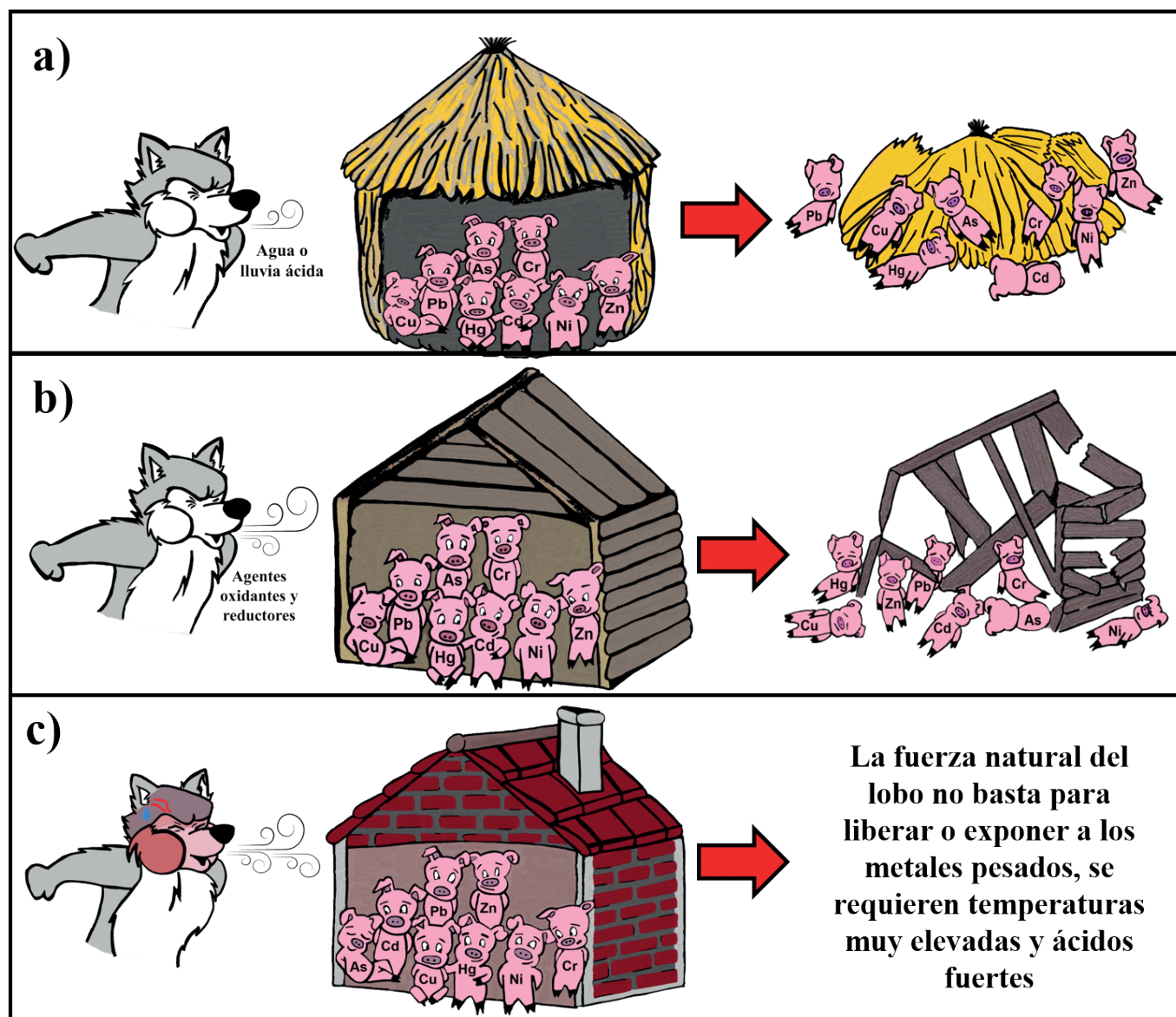


Figura 2. Diferentes materiales en los que se encuentran resguardados los metales pesados y diferentes condiciones que se necesitan para incorporarlos al agua: a) metales pesados muy solubles, b) metales pesados medianamente solubles y c) metales pesados no solubles bajo condiciones naturales. Los autores reconocen y agradecen la valiosa participación de Juan José Zamora Pinzón en la elaboración de los dibujos presentados en esta figura.

de cinco fracciones químicas: 1) intercambiable, 2) carbonatada, 3) óxidos y oxihidróxidos metálicos de hierro y manganeso, 4) sulfuros y materia orgánica y 5) residual. De las fracciones anteriores, las fracciones químicas intercambiables y carbonatada son las de mayor grado de geodisponibilidad, es decir, tienen un elevado grado de movilidad o poder de liberación de los MP hacia el agua. Solo requieren agua o una simple lluvia ácida a temperatura ambiente para su liberación. Si comparamos con el material de construcción de las

casas en el cuento de los tres cerditos, podemos decir que el material de construcción de las casas de estos MP es de paja. Es decir, no se requiere de grandes esfuerzos por parte del lobo para dejar expuestos a los MP (Figura 2a). Continuando con la comparación, la fracción química de óxidos y oxihidróxidos metálicos y la fracción química de sulfuros y materia orgánica serían la casa de madera. Para lograr exponer y liberar los MP de estas fracciones químicas, se requieren condiciones un poco más agresivas: condiciones ácidas, agentes oxidantes, agentes reductores y temperaturas elevadas, esto sería algo como mayor fuerza en el resoplido del lobo (Figura 2b). Finalmente, para liberar a los MP protegidos en la fracción química residual se requieren condiciones mucho más agresivas; ácidos muy fuertes y temperaturas muy elevadas que no se encuentran en ningún ambiente tolerable para los humanos. Podemos decir, que el material de construcción utilizado para la casa de los MP atrapados en esta fracción química son ladrillos, como la casa del tercer cerdito, así que la fuerza natural del lobo no le basta para liberar o exponer a los MP (Figura 2c).

Geodisponibilidad y biodisponibilidad: las inseparables amigas con una gran diferencia

Es muy común escuchar hablar de geodisponibilidad y biodisponibilidad de *MP* de manera indistinta. Sin embargo, se debe tener especial cuidado con el uso o interpretación de estos conceptos porque se encuentran estrechamente relacionados, pero tienen un significado distinto y la manera de analizarse es distinta. El primer paso para predecir si un *MP* será biodisponible es conocer su grado de geodisponibilidad. La biodisponibilidad considera la capacidad de incorporación, asimilación o liberación de *MP* que presenta un organismo desde o hacia su entorno inmediato de acuerdo con sus características biológicas (Caussey y col., 2003). Es decir, la biodisponibilidad es diferente para cada ser vivo porque depende de sus características fisiológicas.

Esto permite marcar la gran diferencia entre los conceptos de geodisponibilidad y biodisponibilidad.

El concepto de geodisponibilidad se aplica para cuestiones abióticas, es el potencial de liberación de *MP* a un medio acuoso y se puede medir a través de algunas técnicas de extracción química secuencial (López Julián y Mandado Collado, 2002), mientras que la biodisponibilidad es un concepto empleado para los organismos y mide la rapidez con la que un *MP* puede ser incorporado por un organismo. La metodología empleada para medir la biodisponibilidad es distinta a la utilizada para medir la geodisponibilidad. Todo esto significa que aquellos *MP* que se encuentran protegidos por la -casa de paja- son los que presentan el mayor grado de geodisponibilidad y en consecuencia están potencialmente biodisponibles para diferentes organismos. Por otro lado, aquellos que se encuentran protegidos por la -casa de madera- presentan un menor grado de geodisponibilidad y la biodisponibilidad para los organismos también disminuye. Finalmente, los *MP* que están dentro de la -casa de ladrillos- no presentan geodisponibilidad y en consecuencia la biodisponibilidad es prácticamente imposible bajo condiciones naturales.

Sin geodisponibilidad no hay biodisponibilidad

Como se mencionó, la geodisponibilidad y biodisponibilidad son dos términos muy relacionados, porque para que se pueda dar la biodisponibilidad de un *MP*, lo primero que debe existir es un elevado nivel de geodisponibilidad y después, que el organismo sea capaz de asimilarlo. A partir de la correcta interpretación de los conceptos de geodisponibilidad y biodisponibilidad es posible comprender que una elevada concentración de *MP* asociada a fracciones poco geodisponibles -óxidos y oxi-hidróxidos metálicos, sulfuros y materia orgánica- y no geodisponible -fracción residual-, no representa un riesgo real para la salud de los seres vivos. Es decir, el hecho de que los *MP* estén presentes en un suelo en elevada concentración, no necesariamente significa que estén biodisponibles. Para que esto suceda dependerá de muchas características del medio y por supuesto, de los seres vivos que estén

en contacto con ellos. Por otro lado, también se puede presentar el caso de tener una concentración muy pequeña de *MP* pero asociados a fracciones químicas geodisponibles -intercambiable y asociados a carbonatos- y que existan organismos que tengan la capacidad para asimilarlos y acumularlos con el paso del tiempo. Esta combinación pondrá en riesgo la salud de esos organismos y a otros organismos que consuman a los organismos contaminados.

La NOM-004-SEMARNAT-2002 especifica que la concentración límite máxima permisible de *MP* para *LR* y

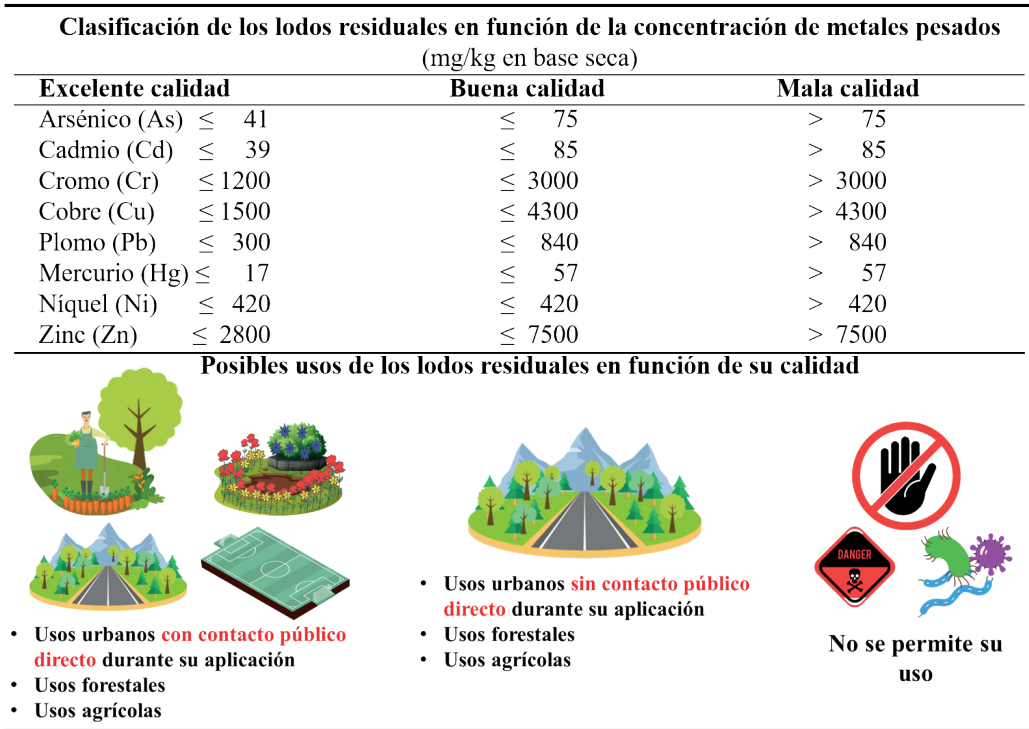


Figura 3. Valores de referencia establecidos por la NOM-004-SEMARNAT-2002 para lodos residuales, su clasificación y posibles usos.

biosólidos “es un valor asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido para que puedan ser dispuestos o aprovechados”. Sin embargo, este valor corresponde a la -concentración total de *MP*-, sin importar si son o no geodisponibles. Es aquí donde surge la necesidad de invitar a las autoridades pertinentes que regulan las normas mexicanas, a que consideren una modificación a la NOM-004-SEMARNAT-2002 y que la concentración límite máxima permisible de *MP* para *LR* y biosólidos, además de la concentración total, sea en función de la concentración geodisponible (concentración verdaderamente peligrosa para microorganismos, plantas, animales y humanos).

Taxco de Alarcón, su planta de tratamiento de aguas negras y sus lodos residuales

En el municipio de Taxco de Alarcón, Gro., se llevó a cabo un estudio con los *LR* de la única *PTAR* con la que cuenta el municipio. Por los antecedentes mineros y de orfebrería dentro del municipio, y por la sospecha de una posible contaminación del agua residual municipal con *MP*, López-Díaz y colaboradores (2022) decidieron realizar un estudio en los *LR* generados por la *PTAR* para identificar la presencia, concentración total de *MP* y su nivel de geodisponibilidad. En el estudio, lograron identificar y cuantificar que los *LR* contienen As, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni y Zn, en concentraciones totales de 51, 50, 38, 752, 153, 190 y 3134 mg/kg, respectivamente. Comparando las concentraciones documentadas en los *LR* con las establecidas por NOM-004-SEMARNAT-2002, se puede observar que pueden clasificarse como *LR* de buena calidad (Figura 3). Además, a pesar de que la norma no lo declara textualmente, si las concentraciones totales determinadas en los *LR* rebasaran los límites permisibles de esta clasificación, deberían ser considerados como *LR* de mala calidad y no se recomendaría su aprovechamiento como posible abono orgánico (Figura 3).

La clasificación de *LR* de buena calidad -basada en concentraciones totales- permite establecer una propuesta para uso urbano y teniendo la precaución de no estar en contacto directo con las personas durante su aplicación, pueden destinarse para usos forestales o mejoramiento de suelos de uso agrícola en la región. Sin embargo, López-Díaz y colaboradores (2022) llevaron a cabo un análisis del fraccionamiento químico de los *MP* presentes en los *LR* mediante extracción química secuencial. Los resultados mostraron que, en el caso del As, Cd y Zn, la mayor concentración (67, 67 y 55%, respectivamente) está asociada a las fracciones químicas de mayor geodisponibilidad. El resto de la concentración se encuentra secuestrada en fracciones químicas que presentan ¡muy baja probabilidad! de incorporación al agua. A pesar de que la mayor concentración de As, Cd y Zn está ligada a las fracciones químicas de mayor geodisponibilidad, las concentraciones en estas fracciones químicas (34, 34 y 1723 mg/kg para As, Cd y Zn, respectivamente) sí permitirían clasificar a los *LR* como de excelente calidad. Siempre y cuando la NOM-004-SEMARNAT-2002 considerara la fracción química geodisponible como concentración límite máxima permisible de *MP* para *LR* y biosólidos (Figura 3).

Finalmente, es importante destacar que siempre que se habla de *MP* como contaminantes se piensa que existe un riesgo para la salud o riesgo de muerte. Sin embargo, con este artículo se pretende aclarar y concientizar al lector que el verdadero peligro de los *MP* depende de la forma química en la que los encontremos en la naturaleza. Demostrar la presencia de *MP* como contaminantes no siempre es sinónimo de peligro, excepto si el análisis se realiza directamente en agua.

Nota complementaria

Los metales pesados son un grupo de elementos de la tabla periódica que presentan propiedades metálicas: brillan y la mayoría son sólidos a temperatura ambiente. Además, son excelentes conductores de la electricidad y el calor. El adjetivo pesado se debe a que literalmente son más pesados que el agua, aproximadamente cinco veces más que el agua. Finalmente, la importancia de estudiar estos elementos es porque no son biodegradables, son persistentes, bioacumulables y bajo ciertas condiciones pueden incorporarse a la cadena alimenticia y causar enfermedades a los seres vivos, incluso la muerte.

Referencias

- Caussy, D., Gochfeld, M., Gurzau, E., Neagu, C., and Ruedel, H. (2003). Lessons from case studies of metals: investigating exposure, bioavailability, and risk. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 56, 45–51. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0147-6513\(03\)00049-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0147-6513(03)00049-6)
- López-Díaz, J. A., Alvira-Serrano, L. A., Talavera-Mendoza, O., Sarmiento-Villagrana, A., and Hernández-Flores, G. (2022). Fraccionamiento químico de metales pesados y metaloides potencialmente tóxicos en lodos residuales generados por la planta de tratamiento de agua residual Taxco de Alarcón, Guerrero, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 74(2), A121221. DOI: <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2022v74n2a121221>
- López Julián, P. L. y Mandado Collado, J. M. (2002). Extracciones químicas secuenciales de metales pesados. Aplicación en ciencias geológicas. *Estudios Geológicos*, 58(5-6), 133-144. DOI: <https://doi.org/10.3989/egool.02585-6118>

BATERÍAS DE LITIO: PERSPECTIVAS HACIA UN FUTURO SOSTENIBLE

Víctor Manuel Barbosa Alonso^{1*}, Edgar Fernando Armendáriz Alonso², José Elías Pérez López³, Roel Cruz Gaona⁴

¹Estudiante de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

²Estudiante de Doctorado en Ingeniería y Ciencia de Materiales. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

³Instituto de Física, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Parque Chapultepec #1570, Privadas del Pedregal, S.L.P., México.

⁴Instituto de Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Sierra Leona #550, Lomas de San Luis, S.L.P., México.

*victor.mbarbosa@outlook.com



Fotografía tomada de internet.

Introducción

Actualmente, los dispositivos electrónicos ocupan un lugar importante en nuestra vida cotidiana impulsada por la tecnología y la movilidad. Ante esta situación, existe una gran necesidad de dispositivos para almacenamiento de energía. Esta demanda ha sido satisfecha gracias a las baterías recargables con tecnología de ion litio. La ligereza y capacidad para almacenar energía de estas baterías las han convertido en la opción preferida en muchas aplicaciones como celulares, laptops y automóviles eléctricos.

Sin embargo, junto con los beneficios que brindan, surge una gran preocupación: ¿qué sucede con estas baterías una vez que las desechamos?. Con el aumento en la demanda de las baterías de litio, es importante buscar soluciones que ayuden a reducir su impacto ambiental al final de su vida útil y que promuevan la sostenibilidad en la producción de nuevas baterías.

El litio y las baterías

El litio tiene características únicas que lo hacen ideal para almacenar energía. Este es el elemento metálico más liviano y tiene uno de los radios atómicos más pequeños; así mismo, puede almacenar energía durante largos períodos sin pérdidas. Estas cualidades permiten construir baterías pequeñas y potentes, lo que

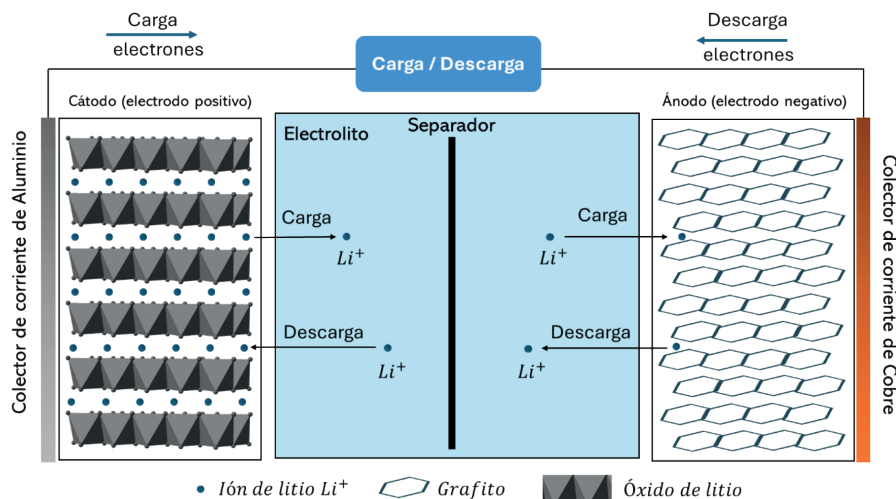


Figura 1. Funcionamiento de una batería de ion litio. Fuente: Elaboración propia.

las ha convertido en la opción preferida de los fabricantes de dispositivos electrónicos y vehículos eléctricos.

Las baterías de litio funcionan por medio de un proceso llamado intercalación del litio, el cual está representado en la Figura 1. La intercalación de litio es un proceso químico que permite que los iones de litio se muevan entre dos partes de la batería, el ánodo y el cátodo, a través de un electrolito. Cuando cargamos la batería, aplicamos una corriente eléctrica que hace que los iones de litio se desplacen desde el cátodo hacia el ánodo, almacenando la energía. Cuando se descarga la batería, este proceso se invierte, con los iones de litio moviéndose del ánodo al cátodo, liberando la energía almacenada como energía eléctrica.

¿Cómo alargar la vida de una batería?

Las baterías de ion litio pueden dejar de funcionar debido a diversas razones, como el deterioro de los materiales en los cátodos o por la formación de sólidos en el electrolito que generan capas en los electrodos y reducen la eficiencia de la batería. Cuando esto ocurre y las baterías de litio ya no sirven, representan un problema ambiental potencial. Si las desechamos de manera adecuada como residuos peligrosos, suelen ser selladas y enterradas en

Palabras clave: baterías, litio, reciclaje, sostenibilidad.

cemento. En cambio, si acaban en un vertedero, éstas pueden corroerse y liberar elementos potencialmente tóxicos, contaminando el medio ambiente.

Para prolongar la vida útil de las baterías, es recomendable seguir algunas prácticas: cargar las baterías antes de que se agoten por completo, evitar dejarlas completamente cargadas durante mucho tiempo, mantenerlas alejadas de temperaturas extremas y usar cargadores específicos para cada tipo de batería. Otra manera efectiva para reducir la cantidad de baterías desechadas es su reutilización; aunque las baterías de litio experimentan una disminución en su rendimiento con el tiempo, aún pueden ser aprovechadas en otras aplicaciones. Por ejemplo, una batería de un vehículo eléctrico que ya no funciona adecuadamente puede ser reutilizada en estaciones de almacenamiento de energía solar, donde su capacidad residual puede ser valiosa para almacenar energía renovable. Esta práctica extiende la vida útil de las baterías y aprovecha su potencial más allá de su uso inicial. Sin embargo, es importante tener en cuenta que incluso las baterías reutilizadas eventualmente llegarán al final de su vida útil y el reciclaje se convierte en una parte crucial del ciclo de vida de las baterías de litio.

Suministro de materias primas

Las baterías de ion litio están fabricadas con una serie de materiales adicionales al carbono. En el ánodo se utilizan materiales que sean capaces de alojar los iones de litio, como el grafito. El cátodo está fabricado de materiales de óxidos de litio junto con otros metales como cobalto, níquel y manganeso. Estos materiales son clave para el buen funcionamiento de las baterías de litio, pero también representan un reto en la sostenibilidad. Obtener litio, y los demás materiales mencionados, es un gran desafío para la fabricación de baterías en los próximos años, ya que con la creciente demanda de vehículos eléctricos y dispositivos electrónicos, la disponibilidad de dichos recursos es una limitante para la sostenibilidad de esta tecnología. Si no se implementan medidas efectivas para enfrentar este problema, podríamos enfrentarnos a una escasez en el suministro de litio a partir de 2028 y de cobalto a partir de 2025, según la Agencia Internacional de Energía (2021). La Figura 2 muestra la ubicación y porcentaje de las reservas mundiales de litio. Se estima que hay alrededor de 98 millones de toneladas de reservas mundiales de litio, principalmente en Bolivia, Argentina, Chile y Australia (U.S. Geological Survey, 2023). Estos países enfrentan escasez de agua, y la producción de litio requiere grandes cantidades de agua, empeorando la demanda hídrica de estos países.

La información disponible sobre las tasas de reciclaje de baterías de litio no es muy precisa. Se estima que solo alrededor del 1-5 % de las baterías de litio en todo el mundo se reciclan. Esta cifra es bastante baja en comparación con el reciclaje de baterías de plomo, que tiene una tasa de reciclaje del 99 %. Las baterías de plomo son más fáciles de reciclar porque

su tamaño y composición química son más homogéneos, lo que facilita su recolección y reciclaje.

Una ventaja del reciclaje de baterías de litio es que éstas tienen un mayor contenido de minerales formadores de las baterías en comparación con las fuentes naturales. Por ejemplo, para obtener una tonelada de litio, se requieren 750 toneladas de salmuera, o bien, 28 toneladas de baterías desechadas. En el caso del cobalto, se necesitan 300 toneladas de mineral, o bien, de 5 a 15 toneladas de baterías desechadas para obtener una tonelada de cobalto. Por medio del reciclaje de baterías de litio se puede asegurar un suministro sostenible de materiales para nuevas baterías y reducir los riesgos asociados con una disposición inadecuada al final de su vida útil.

Normativa

En México, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos es la única regulación referente a la disposición final de las baterías de litio. En esta ley se clasifica a las baterías de litio como residuo de manejo especial. Sin embargo, no especifica esquemas de recolección, tratamiento y reciclaje para las baterías de litio al final de su vida útil como en otros países. En la Unión Europea y en China, ya se han establecido directivas que definen esquemas de recolección y financiamiento para el tratamiento, reciclaje y disposición de baterías al final de su vida útil. Los países de la Unión Europea tienen como objetivo alcanzar tasas de recolección del 65% para 2025 y metas más ambiciosas de recuperación de materiales para 2030. En Estados Unidos, aún no se han establecido objetivos de recolección y tratamiento de baterías de litio, pero recientemente se presentaron leyes para promover su reciclaje.

Baterías de Sodio

Una posible vía para abordar los desafíos actuales en el mundo de las baterías es explorar alternativas al litio, siendo el sodio una opción prometedora. Esta tecnología

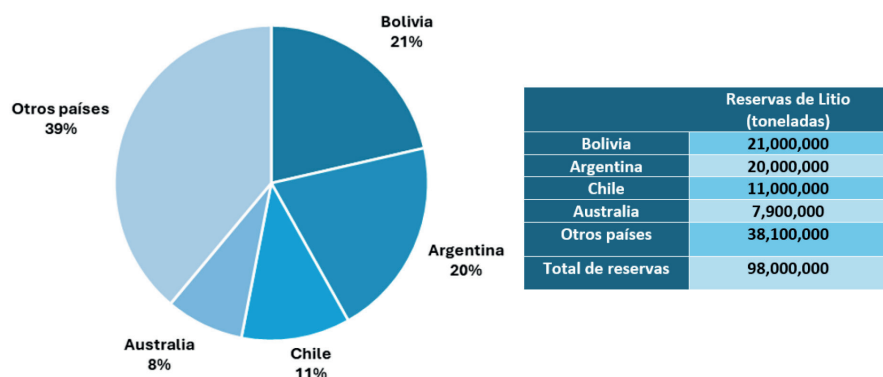


Figura 2. Reservas Mundiales de Litio en 2023. Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. Salar de Maricunga, una de las principales reservas de litio en Chile. Fuente: Elaboración propia.

aún se encuentra en desarrollo, pero el sodio ofrece ventajas notables en comparación con el litio: es más abundante, barato y amigable con el medio ambiente que el litio. Además, la tecnología de fabricación de baterías de litio se puede adaptar para la fabricación de baterías de sodio. Sin embargo, el sodio es más pesado que el litio y las baterías de sodio tienen un voltaje menor que las de litio. A pesar de esto, la investigación continua y los avances en esta tecnología podrían abrir el camino hacia soluciones más sostenibles.

Desarrollo de métodos de reciclaje: el Ácido Oxálico

Es esencial encontrar maneras de recuperar materiales valiosos de las baterías desechadas, incluso con el avance de nuevas baterías hechas de materiales diferentes al litio. Actualmente, se están investigando procesos llamados 'hidrometalúrgicos' que emplean ácidos para la recuperación de los metales valiosos. En estos procesos primero se realiza una separación mecánica para recuperar el material que contiene los metales valiosos (ej: litio, cobalto y níquel). Este material se trata con ácidos para disolver los metales valiosos y posteriormente se purifican. Estos procesos son eficientes, de bajo consumo energético, y los productos no requieren refinamiento para ser utilizados en la fabricación de nuevas baterías.

En cuanto a los ácidos utilizados para disolver los metales en estos procesos, en los últimos años se ha explorado el uso tanto de ácidos orgánicos como inorgánicos. Los ácidos orgánicos, aunque más costosos, ofrecen beneficios como biodegradabilidad, menor corrosión y capacidad de disolución de metales específicos. Aquí, el ácido oxálico emerge como una opción prometedora. Su uso ha logrado una recuperación del 98% de

litio y el 99% de cobalto (Verma et al., 2020). Además, facilita procesos posteriores de separación, ya que algunos metales, como el litio, se disuelven mientras que otros, como el cobalto, se precipitan. Esta opción es prometedora en cuestión de eficiencia y reducción del impacto ambiental en comparación con otros ácidos.

Conclusión

Las baterías de litio han revolucionado numerosos campos debido a su eficiencia y capacidad para almacenar energía. Sin embargo, con el aumento de su uso, surge la necesidad urgente de abordar los desafíos ambientales y de sostenibilidad asociados con su producción, uso y desecho. Podemos adoptar prácticas para prolongar la vida útil de las baterías de litio, pero eventualmente todas llegarán al final de su vida útil. Por esto es fundamental impulsar el reciclaje de las baterías de litio y promover la investigación de nuevas tecnologías y materiales para fabricar baterías más sostenibles. El desarrollo de posibles soluciones como las baterías de sodio y el reciclaje con ácido oxálico ofrecen ventajas para un futuro más limpio y sostenible.

Además, se requiere una colaboración estrecha entre gobiernos, industrias y la sociedad en general. Es necesario establecer regulaciones que fomenten y faciliten el reciclaje adecuado de las baterías de litio y promuevan la investigación y adopción de tecnologías más sostenibles. Al tomar medidas ahora para abordar los desafíos relacionados con las baterías de litio, podemos garantizar un suministro seguro de energía para el futuro, al tiempo que protegemos y preservamos nuestro medio ambiente para las generaciones venideras.

Referencias

- Outlook Special Report. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>
- U.S. Geological Survey, 2023, Mineral Commodity Summaries 2023. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf>
- Verma, A., Johnson, G., Corbin, D. & Shiflett, M., 2020, Separation of Lithium and Cobalt from LiCoO₂: A Unique Critical Metals Recovery Process Utilizing Oxalate Chemistry. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 8, 6100-6108

Nuestra Tierra

Revista de divulgación

Nuestra Tierra es una publicación semestral de la Estación Regional del Noroeste de la Universidad Nacional Autónoma de México con la cooperación del Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora. Es un medio de divulgación de Ciencias Naturales como son las Ciencias de la Tierra y las Biológicas, aunque puede cubrir otras áreas del conocimiento científico. Su objetivo es presentar, de manera accesible, artículos y reportajes sobre investigaciones en estos campos, tanto en México como en otras partes del mundo, además de temas de interés general relacionados con nuestro planeta y el universo.

Se sugiere que los autores de las contribuciones sean especialistas o conocedores del tema. No se aceptan, en cambio, artículos de investigación ni informes de trabajo. La revista está dirigida a personas con estudios universitarios y estudiantes de nivel medio superior, por lo que se deben seguir las siguientes normas:

Normas Editoriales

Tipos de contribuciones: 1) artículos cortos de 1 a 2 cuartillas incluyendo las ilustraciones; 2) artículos en extenso, de 3 a 6 cuartillas incluyendo las ilustraciones.

Lenguaje: Los autores deben utilizar un lenguaje claro y sencillo, sin ser coloquial, ya que se debe hacer accesible la información sin perder rigor académico.

Terminología especializada: Se debe evitar el uso de términos técnicos y especializados siempre que sea posible. En caso de que su uso sea indispensable, estos deben acompañarse de una definición breve y clara entre paréntesis, comillas, en una nota al pie de página o cuadro de texto resaltado.

Abreviaturas y acrónimos: Sólo utilizar los de uso común y ampliamente comprendidos por el público en general.

Texto: Los artículos deben ser redactados en español, en formato "Word", con letra Times New Roman, tamaño 11, interlineado a doble espacio y todos los márgenes de 2.5 cm. Se recomienda dividir el texto mediante subtítulos en negrita (sin numerar). Se debe incluir un resumen de 80 a 100 palabras y 3 a 4 palabras clave relacionadas con el artículo. En el texto no deben incluirse agradecimientos ni dedicatorias.

Imágenes, fotografías, cuadros y figuras: Las imágenes, fotografías, cuadros y figuras deben incluirse en el texto en la secuencia correspondiente y también enviarse como archivos independientes numerados en el orden de aparición. El texto debe estar en español y ser legible. En caso de utilizar imágenes de terceros, se debe adjuntar el formato descargable con la cesión de derechos del autor original y contar con los permisos de reproducción correspondientes cuando no sean de creación propia. El número máximo de imágenes será de 5. Las imágenes deberán tener una resolución mínima de 300 dpi, con formato JPEG, PNG, TIFF o PDF. Si las imágenes provienen de internet, se recomienda guardarlas con el tamaño más grande para asegurar la mejor resolución posible.

Los pies de figura deben incluirse debajo de la imagen o gráfico, indicando el número correspondiente y deben proporcionar la información necesaria para comprender el contenido sin la necesidad de consultar el texto principal.

Citas: Se sugiere un máximo de 3 citas a lo largo del texto, utilizando el siguiente formato:
Para un autor: apellido y fecha (Torres, 1997).

Para dos o más autores: en orden cronológico (Torres et al., 1987; Barrón, 2006).

Referencias: Deben ir al final del texto utilizando el formato APA. Ejemplo: Apellido(s), Inicial(es), Año, Título: Título de la revista, volumen, número de la primera y la última página del artículo. Ejemplo: Barrios D., 1991, El oro y la historia de Perú: Historia Latinoamericana, 100, 35-40.

Envío: Los trabajos deberán enviarse en formato DOC o RTF (Rich Text Format). El nombre del archivo deberá incluir el primer apellido del autor principal y una palabra clave relacionada con el artículo. Ej: Larios_volcanes.doc

Revisión: Los artículos recibidos serán sometidos a una evaluación inicial para determinar si cumplen con los objetivos y estándares de la revista. Si se requieren modificaciones sustanciales, el manuscrito podrá ser devuelto con sugerencias antes de su revisión. Aquellos que superen esta etapa pasarán a una revisión por pares bajo el sistema de simple ciego. Los comentarios y observaciones se enviarán al autor para correcciones. Los artículos que no alcancen la calidad requerida en contenido o escritura podrán ser rechazados sin responsabilidad por parte de la revista.

¿Te interesa publicar con nosotros?

Envía tu artículo al correo:

nuestratierra@geologia.unam.mx

Contacto: Blanca González, editora responsable

Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología,
UNAM, Hermosillo, Son.

AGENDA TIERRA



JUNIO							 Día Mundial del medio ambiente  Día mundial de los océanos  Día mundial de la lucha contra la desertificación y la sequía  Día internacional de los trópicos  Día internacional de los asteroides
D	L	M	M	J	V	S	
5			8				
					17		
			29	30			

Este espacio está dedicado a compartir los días mundiales e internacionales proclamados por la ONU, con el propósito de generar conciencia sobre temas relevantes que fomenten el interés en la protección de nuestro entorno natural.

En esta edición, destacamos el **Día Mundial de la Lucha contra la Desertificación y la Sequía**.

La desertificación es la degradación progresiva de la tierra en ecosistemas frágiles, lo que conlleva la pérdida de nutrientes en el suelo y el agotamiento de los acuíferos subterráneos. Este fenómeno representa una amenaza creciente, pero también es posible revertir sus efectos mediante acciones adecuadas.

¿Qué podemos hacer este día?

Informarnos, generar conciencia, compartir fotografías e historias de las zonas afectadas, y apoyar proyectos locales de restauración y manejo sostenible del suelo.

Referencia: <https://www.unccd.int/events/desertification-drought-day>

Aimé Orcí. Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Luis D. Colosio y Madrid, Hermosillo, Sonora, México. C.P.83000.



ESTUDIA UNA MAESTRÍA O DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA EN LA UNAM

Desarrolla habilidades clave para la ciencia actual:

- ✓ Trabajo colaborativo interdisciplinario
- ✓ Comunicación científica efectiva

Y fortalece actitudes esenciales:

- ✓ Ética y autonomía científica
- ✓ Compromiso con la sociedad y el planeta

Especialízate en temas clave como geología, geofísica, recursos energéticos y minerales, procesos de la superficie terrestre (zona crítica), y geociencia computacional, entre otros.

Forma parte de una comunidad académica de excelencia con más de 300 tutores especializados, acceso a infraestructura de vanguardia, y redes de colaboración nacionales e internacionales.

¡INSCRÍBETE!
www.pctierra.unam.mx

