

Novedades científicas
De actualidad
Noticias de la AMC



Erika E. Ríos Valenciana y Lourdes B. Celis



Microorganismos que ayudan a descontaminar agua con arsénico

Algunas bacterias con metabolismos extraordinarios ayudan a formar minerales que remueven el arsénico del agua y lo mantienen inmovilizado. Estas bacterias viven en sitios contaminados y se adaptan genéticamente; es decir, aprenden a oxidar y reducir metales para obtener energía. La biotecnología ambiental aprovecha estas bacterias para descontaminar agua, permitiendo que sea apta para actividades humanas.

Introducción

¿Cuál es la problemática?

El arsénico (As) es un elemento químico muy tóxico para los seres vivos. Actualmente la presencia de arsénico en acuíferos constituye una crisis mundial que se ha documentado en 108 países, incluyendo México, en donde las aguas subterráneas de las zonas áridas y semiáridas son las más afectadas por concentraciones de arsénico que exceden los 50 µg/L (Nava-Reyna y Medrano-Macías, 2022). En México, las zonas áridas y semiáridas representan 40 % del territorio nacional y el problema se hace mayor ya que en dichas zonas se estima que entre 70 y 90 % del agua para consumo humano y otras actividades (ganadería, agricultura, recreación) proviene de agua subterránea. En al menos 19 estados de la República Mexicana se han detectado concentraciones de arsénico en agua subterránea que exceden el límite máximo que estipula la norma mexicana (25 µg/L) para agua destinada a consumo humano (véase la **Figura 1**). Actualmente, el límite varía de acuerdo con la población abastecida y en la norma se indica que disminuirá cada año hasta alcanzar el máximo permisible de 10 µg/L en los seis años posteriores a la publicación de la norma, que será aplicable en todo México (NOM-127-SSA1-2021; Nava-Reyna y Medrano-Macías, 2022). Por lo tanto, la explotación de acuíferos contaminados para el abastecimiento de agua es un riesgo latente en nuestro país. Debido a lo anterior, es crucial dirigir esfuerzos para resolver o mitigar este problema nacional. En nuestro grupo de trabajo de Biotecnología Ambiental, en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica

Estados con incidencia de arsénico en agua subterránea

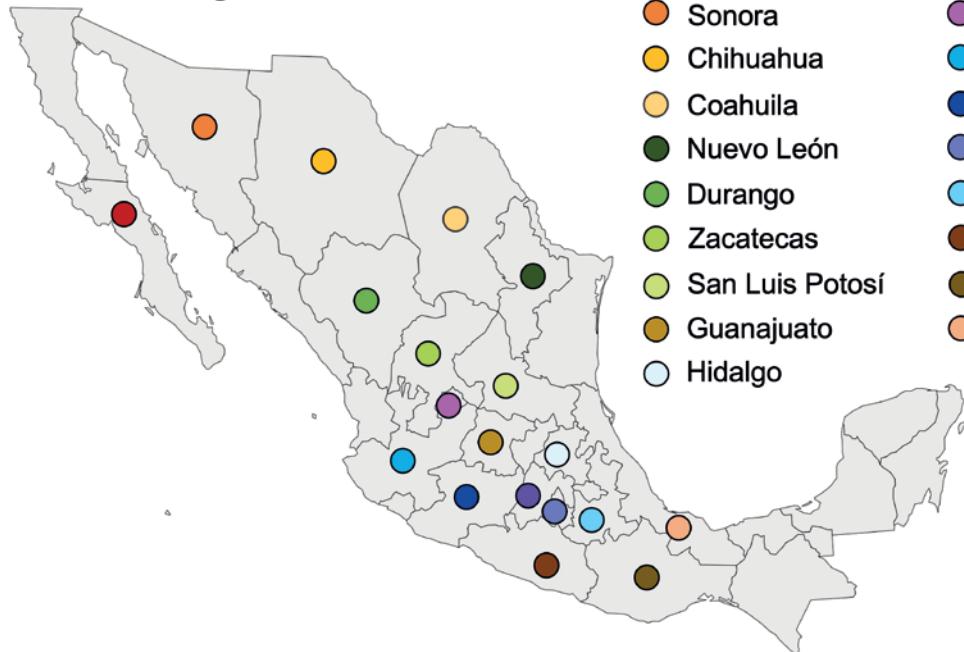


Figura 1. Estados de la República Mexicana donde se han reportado concentraciones de arsénico mayores a 10 µg/L en agua subterránea. El límite permisible establecido por la Organización Mundial de la Salud es de 10 µg/L.

(IPICYT), desarrollamos biotecnologías sustentables y eficientes para remover arsénico de acuíferos.

¿Cómo llega el arsénico al agua?

Es importante mencionar que el arsénico es uno de los 20 elementos más abundantes en la corteza terrestre y naturalmente forma parte de más de 300 minerales (Drahota y Filippi, 2009), de modo que no es raro que encontremos arsénico en los minerales presentes en suelos y sedimentos de cuerpos de agua. El problema comienza cuando, por procesos naturales y por actividades antropogénicas como la minería (entre otras), el arsénico se disuelve de las fases minerales y permanece en el agua. Los procesos naturales de disolución de arsénico en acuíferos requieren mucho tiempo. Sin embargo, debido a la escasez de agua, cada vez más se extrae agua subterránea a mayor profundidad, líquido que pudo haber estado almacenado en el subsuelo durante miles de años. Dependiendo de los minerales que componen el acuífero, es posible que esa agua contenga elementos

tóxicos como el arsénico. Por otro lado, la minería acelera los procesos de disolución al exponer grandes cantidades de minerales al oxígeno y agua del ambiente (Nava-Reyna y Medrano-Macías, 2022).

Remediación de arsénico

Proceso (o procesos) para disminuir los efectos tóxicos del arsénico en las personas o el ambiente, mediante su remoción o decremento de concentración. Los procesos pueden ser fisicoquímicos, biológicos o combinados.

Procesos microbianos y su relevancia en el tratamiento de arsénico

En las últimas dos décadas se han registrado importantes avances biotecnológicos para la **remediación de arsénico** basados en procesos microbianos. Para comprender cómo funcionan dichas biotecnologías, una pregunta crucial es: ¿de dónde obtienen los microorganismos la energía que requieren para crecer y reproducirse? La respuesta es: mediante reacciones de oxidación y reducción de especies químicas (iones o moléculas). Cabe mencionar que todos los organismos vivos obtenemos la energía y los nutrientes necesarios para vivir de esta forma, oxidando y reduciendo moléculas en nuestro metabolismo. Una reacción de oxidación ocurre cuando una especie

química pierde electrones. En contraparte, la reducción ocurre cuando una especie química gana electrones. La pérdida y ganancia de electrones siempre debe ocurrir simultáneamente para que se lleve a cabo la reacción de oxidación-reducción. Por ejemplo, un donador de electrones para los microorganismos puede ser la materia orgánica (representada como CH_2O , **Figura 2**). Existen bacterias que oxidan materia orgánica y los electrones que obtienen los usan para reducir oxígeno (O_2), que es el **aceptor final de electrones** (**Figura 2**). Este proceso lo conocemos como respiración de oxígeno o respiración aerobia, y también es la forma en que los humanos y otros seres vivos respiramos. Múltiples bacterias son aerobias ya que sólo pueden respirar oxígeno; en contraste, existen otras bacterias que no respiran oxígeno, por lo tanto, son anaerobias. Las bacterias anaerobias pueden respirar otras especies químicas durante la oxidación de materia orgánica. Por ejemplo, algunas respiran o reducen sulfato (SO_4^{2-}) y lo transforman en sulfuro (HS^-), otras respiran hierro férrico (Fe^{3+}) y lo convierten en hierro ferroso (Fe^{2+}) (**Figura 2**). Éstos son algunos ejemplos, ya que las bacterias son muy diversas desde el punto de vista de su metabolis-

mo y pueden usar una gran variedad de compuestos o especies para respirar. En presencia de oxígeno o nitrato (NO_3^-), otros microorganismos extraordinarios usan especies químicas inorgánicas (sin carbono) como donadores de electrones y energía para crecer. De tal forma que, en lugar de oxidar materia orgánica, oxidan especies químicas reducidas, como Fe^{2+} o HS^- , mientras reducen O_2 o NO_3^- (**Figura 2**).

Los procesos microbianos que ocurren en el medio ambiente son influenciados por las condiciones ambientales y las comunidades microbianas que habitan el sitio. Si existe un microambiente rico en oxígeno, éste tendrá un potencial redox positivo y preferentemente ocurrirán reacciones aerobias; pero, ¿qué sucede cuando se agota el O_2 ? Como ejemplo tenemos el subsuelo o sedimentos, donde debido a la profundidad se agota el oxígeno, en cuyo caso se favorecen reacciones anaerobias (**Figura 2**). Es decir, en ausencia de O_2 los microorganismos efectuarán respiración de hierro, sulfato, nitrato y muchos otros aceptores de electrones. Uno de esos “otros” aceptores de electrones es el arsenato (As^{5+}), que en el ambiente se encuentra en forma de oxoaniones de arsénico (H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-}).

Acceptor final de electrones

Hace referencia al compuesto o molécula que recibe los electrones al final del proceso metabólico de respiración (aerobia o anaerobia).

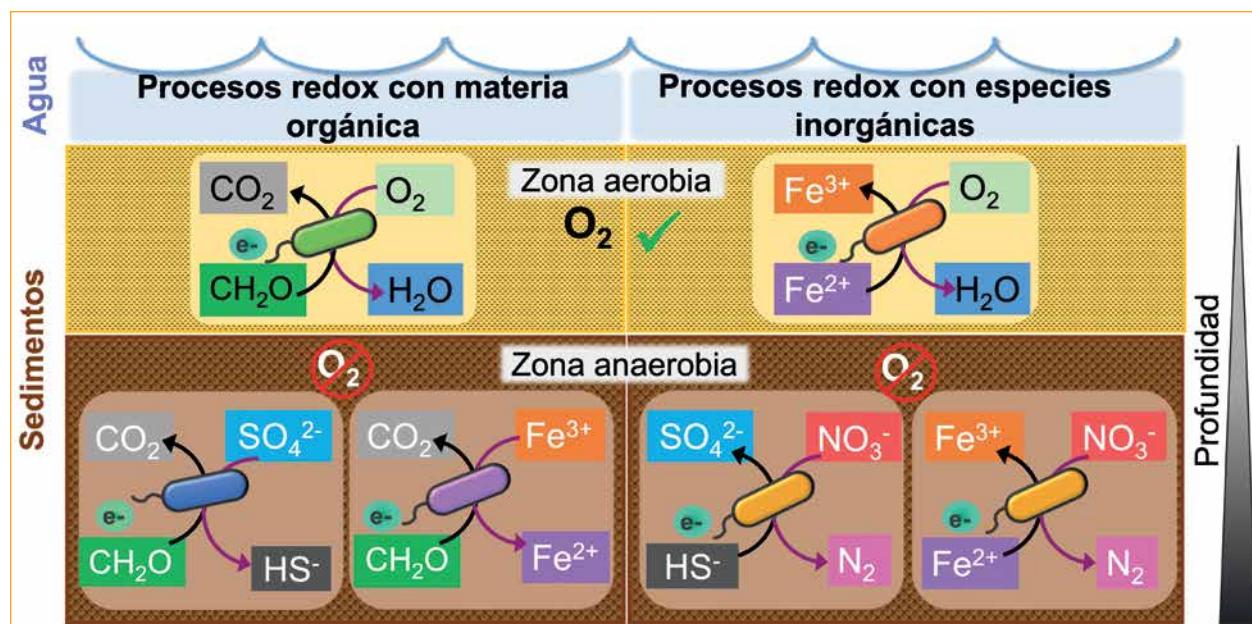


Figura 2. Procesos microbianos (redox) de reducción acoplados a la oxidación de materia orgánica o de especies químicas inorgánicas en los sedimentos de un cuerpo de agua. En la zona aerobia se oxida materia orgánica o hierro ferroso (Fe^{2+}) con oxígeno (O_2), mientras que a mayor profundidad, en la zona anaerobia, se oxida la materia orgánica y se reduce hierro férrico (Fe^{3+}) o sulfato (SO_4^{2-}). En ausencia de O_2 , también se puede oxidar sulfuro (HS^-) o Fe^{2+} con nitrato (NO_3^-).

■ Biotecnologías para inmovilizar arsénico en minerales estables

■ La gran problemática de la contaminación por metales y metaloides tóxicos –como, por ejemplo, hierro, zinc, cadmio y arsénico– radica en que no se pueden degradar o transformar en compuestos o elementos inocuos, ya que solamente cambian su estado de oxidación. Es decir, el hierro no deja de ser hierro, ni el arsénico deja de ser arsénico. Los metales y metaloides sólo cambiarán su especiación química (ganarán o perderán electrones) dependiendo del proceso de descontaminación que se use. Las alternativas son: su inmovilización al formar parte de fases minerales estables, o el confinamiento de los residuos tóxicos o de los productos de la remediación.

Afortunadamente, la ciencia ha permitido desarrollar biotecnologías que aprovechan las capacidades metabólicas de los microorganismos para la remediación de acuíferos contaminados con metales o metaloides. Es crucial destacar que cada acuífero cuenta con una comunidad microbiana nativa única debido a sus características biológicas, químicas y **composición geológica**. De tal forma que los procesos biotecnológicos son un traje a la medida y su éxito aumentará si se aprovechan los microorganismos nativos, ya que éstos se encuentran adaptados a las condiciones ambientales extremas y pueden tolerar altas concentraciones de elementos tóxicos.

Hasta ahora, sabemos que el arsénico se puede inmovilizar en fases minerales, lo cual es deseable para evitar que continúe disuelto en el agua. Sin embargo,

la formación de minerales de forma natural es un proceso químico muy lento que depende de múltiples factores ambientales (concentración de especies químicas, temperatura, presión, pH, etc.). La buena noticia es que algunos microorganismos pueden acelerar la producción de especies químicas, permitiendo la formación de **minerales biogénicos** en períodos de tiempo cortos (días), y en condiciones normales de temperatura (25 °C), presión (1 atm) y pH (cercano al neutro ~7.0). Dicho proceso se conoce como *bioprecipitación* y se puede aplicar para tratar sitios contaminados con arsénico.

■ Producción de sulfuros de arsénico y sulfuros de hierro biogénicos

■ Si bien es cierto que el arsénico causa efectos adversos en la salud humana, diversas bacterias pueden respirarlo o usarlo para obtener energía. En forma simplificada, las bacterias que respiran arsénico reducen el arsenato (As^{5+}) hasta arsenito (As^{3+}) usando electrones que obtienen de la oxidación de materia orgánica; este proceso se denomina *arsenato reducción*. Existen bacterias extraordinarias –por ejemplo del género *Desulfosporosinus*– que simultáneamente pueden reducir arsenato, sulfato, hierro y nitrato. Dichas bacterias se pueden aprovechar para tratar agua con mezclas de dichos contaminantes.

En nuestro grupo de trabajo investigamos la reducción simultánea de arsenato, sulfato y hierro en cultivos microbianos que producen minerales que inmovilizan arsénico (Ríos-Valenciana y cols., 2020). Por ejemplo, la reducción simultánea de arsenato y sulfato genera arsenito y sulfuro, respectivamente. Posteriormente, por reacciones químicas, el arsenito y el sulfuro forman minerales denominados sulfuros de arsénico –como el mineral denominado rejalar (As_4S_4) y el oropimente (As_2S_3)– (véase la **Figura 3**). En ambientes donde hay hierro también ocurrirá la reducción microbiana de hierro produciendo sulfuros de hierro –makinawita (FeS)– que coprecipitan con el arsénico (**Figura 3**). Dichos minerales se conocen como **sulfuros biogénicos**, ya que las bacterias promueven su formación. Los sulfuros de arsénico biogénicos permiten inmovilizar arsénico y remo-

Mineral biogénico

Se forma y precipita debido a que los microorganismos producen las especies químicas y las condiciones necesarias para su formación.

Composición geológica

Se refiere a la estructura y las diferentes especies químicas y minerales presentes en sedimentos y suelos.



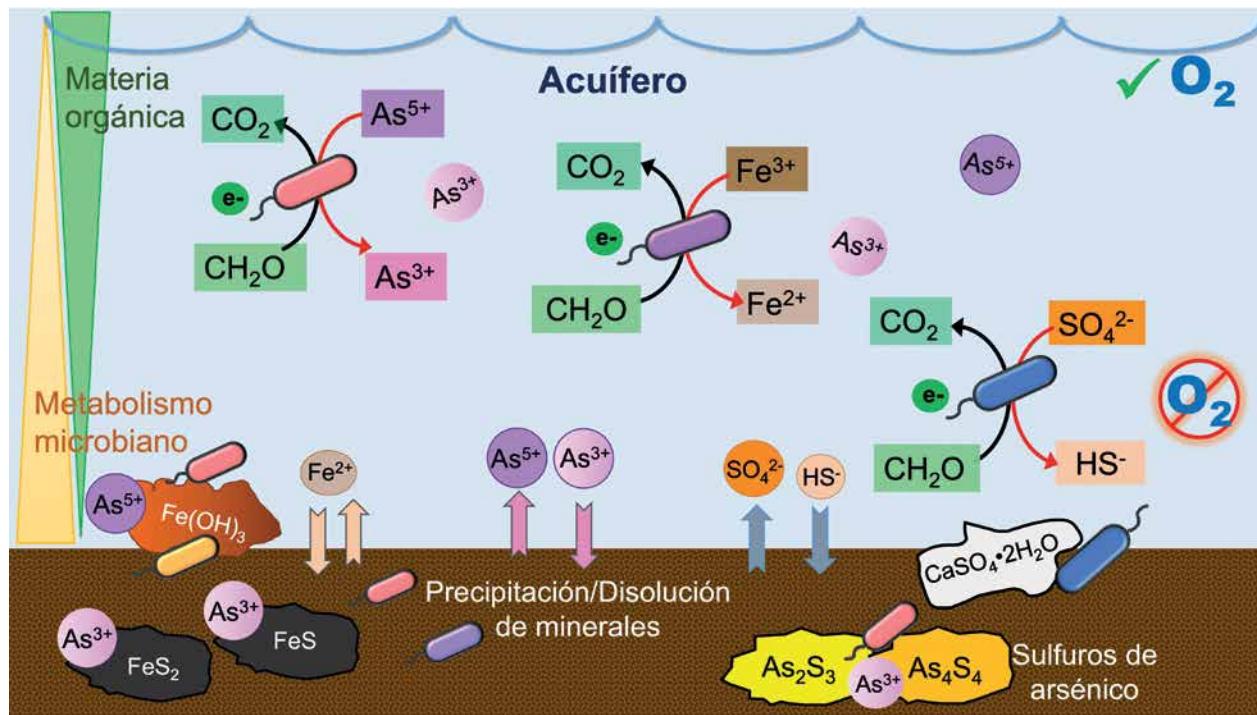


Figura 3. Ambientes anaerobios que muestran la precipitación y disolución de minerales por la acción de microorganismos. En la matriz sólida de algunos acuíferos existen minerales que son fuente de As^{5+} , Fe^{3+} y SO_4^{2-} para los microorganismos que, al respirarlos (reducirlos), formarán As^{3+} , Fe^{2+} y HS^- , permitiendo que precipiten los sulfuros de arsénico y hierro.

verlo de la fase líquida, y así se puede disminuir la concentración del arsénico disuelto en el agua para que ésta sea apta para consumo humano, irrigación u otras actividades. Además, se trata de minerales estables que generan una mínima cantidad de residuos sólidos, ya que pueden contener hasta 70 % en peso de arsénico y paulatinamente se integran en los sedimentos del cuerpo de agua.

Thiobacillus y *Leptospirillum* pueden oxidar Fe^{2+} a Fe^{3+} y promover la precipitación de óxidos de hierro que a su vez remueven el arsénico disuelto en el agua. La implementación de esta técnica se recomienda en ambientes aerobios y ricos en hierro.

■ Producción de óxidos de hierro que adsorben grandes cantidades de arsénico

- Para remediar agua contaminada con arsénico se ha investigado ampliamente la oxidación microbiana de Fe^{2+} a Fe^{3+} en presencia de O_2 o NO_3^- como aceptores de electrones. El agua superficial o subterránea tiene un pH entre 5 y 8.5; en este intervalo de pH, el Fe^{3+} es insoluble, por lo que inmediatamente se forman minerales conocidos como óxidos de hierro –por ejemplo, ferrihidrita, Fe(OH)_3 –, que poseen una capacidad excepcional para adsorber arsénico. Las bacterias que conforman los géneros *Gallionella*,

Destino final de los minerales biogénicos y su potencial aplicación

■ Como se explicó previamente, los minerales biogénicos inmovilizan el arsénico. Sin embargo, es importante averiguar si dichos minerales representan una alternativa segura de tratamiento. Con este propósito se han efectuado estudios para evaluar la estabilidad de los minerales biogénicos en los siguientes escenarios: 1) **lixiviación** de arsénico, cuando el mineral se expone a soluciones acuosas con un pH moderadamente ácido, una posible condición en vertederos de residuos; 2) percolación de agua a través del mineral en flujo continuo; es decir, se hace pasar agua en una columna que contiene el mineral y se registra la disolución de arsénico. Mediante las

◀ Lixiviación

Proceso para extraer compuestos solubles de un sólido al hacer pasar un líquido a través del sólido.

pruebas anteriores es posible determinar si los minerales biogénicos se pueden disponer como residuos no peligrosos, siempre y cuando la concentración de arsénico en el lixiviado sea menor que 5 mg/L (Jong y Parry, 2005).

Por otro lado, los minerales biogénicos, como los sulfuros de arsénico, tienen aplicaciones potenciales en el desarrollo de materiales fotoactivos, conductores y semiconductores que pueden usarse para fabricar dispositivos electrónicos. Estas tecnologías involucran el uso de nanomateriales cuya síntesis requiere condiciones extremas de pH, presión y temperatura. En contraste, las bacterias pueden formar nanomateriales en condiciones ambientales no extremas; por ejemplo, con cultivos puros de una cepa bacteriana del género *Shewanella* se pudieron precipitar nanofibras de sulfuros de arsénico con propiedades semiconductoras (McFarlane y cols., 2015). Sorprendentemente, también algunos consorcios microbianos con capacidad de reducir sulfato y arsenato, cultivados en nuestro laboratorio, forman nanofibras de sulfuros de arsénico (véase la **Figura 4**). En este contexto, es importante la caracterización química y morfológica detallada de los minerales biogénicos (Ríos-Valenciana y Celis, 2025).

■ Mensaje para llevar a casa

■ Podemos aprovechar algunos microorganismos que se encuentran en la naturaleza para remover arsénico del agua y transferirlo a un sólido. Los microorganismos favorecen y aceleran reacciones químicas de oxidación y reducción, promoviendo la rápida formación y precipitación de minerales biogénicos. Cuando el arsénico forma parte de ciertos minerales, como el oropimente (As_2S_3) o el rejalar (As_4S_4), se evita su presencia en el agua y su incorporación en las cadenas alimentarias. Actualmente, se están desarrollando biotecnologías de biorremediación basadas en las capacidades metabólicas de microorganismos nativos de sitios contaminados con arsénico. Los esfuerzos de investigación en este campo permitirán optimizar el diseño de estrategias para su aplicación *in situ*.

Erika E. Ríos Valenciana

División de Ciencias Ambientales, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, San Luis Potosí.
erika.rios@ipicyt.edu.mx

Lourdes B. Celis

División de Ciencias Ambientales, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, San Luis Potosí.
celis@ipicyt.edu.mx

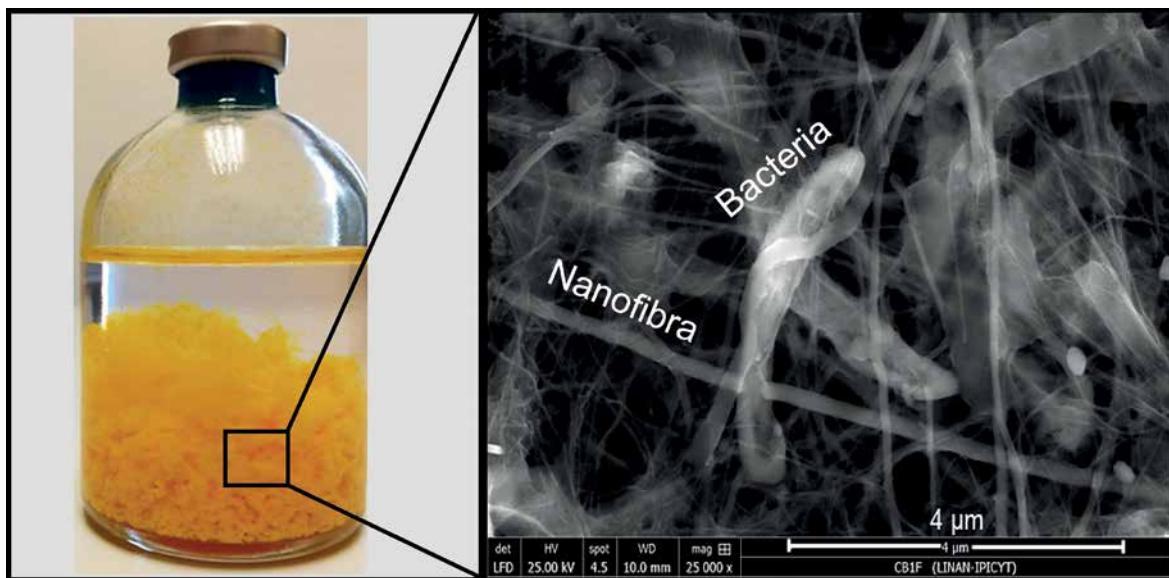


Figura 4. Aspecto del sulfuro de arsénico biogénico producido mediante un cultivo microbiano que reduce arsenato y sulfato. En el cultivo, el mineral se observa como un precipitado amarillo. A la derecha se muestra una micrografía obtenida por microscopía electrónica de barrido. Fotografía: Erika Ríos. Micrografía: LINAN-IPICYT.

Lecturas recomendadas

- Drahota, P. y M. Filippi (2009), “Secondary arsenic minerals in the environment: A review”, *Environment International*, 35(8):1243-1255.
- Jong, T. y D. L. Parry (2005), “Evaluation of the stability of arsenic immobilized by microbial sulfate reduction using TCLP extractions and long-term leaching techniques”, *Chemosphere*, 60:254-265.
- McFarlane, I. R., J. R. Lazzari-Dean y M. Y. El-Naggar (2015), “Field effect transistors based on semiconductive microbially synthesized chalcogenide nanofibers”, *Acta Biomaterialia*, 13:364-373.
- Nava-Reyna, E. y J. Medrano-Macías (2022), “Arsenic occurrence in the environment: Current situation of the Comarca Lagunera in northern Mexico and bioremediation approaches”, *Journal of Agriculture and Food Research*, 10:100379.
- Ríos-Valenciana, E. E., R. Briones-Gallardo, L. F. Chazaro-Ruiz, N. E. Lopez-Lozano, R. Sierra-Álvarez y L. B. Celis (2020), “Dissolution and final fate of arsenic associated with gypsum, calcite, and ferrihydrite: Influence of microbial reduction of As(V), sulfate, and Fe(III)”, *Chemosphere*, 239:124823.
- Ríos-Valenciana, E. E., y L. B. Celis (2025), “Bioprecipitation of arsenic sulfide nanofibers in synthetic groundwater by indigenous bacterial consortia from arsenic-polluted sediments”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(3):117032.
- Secretaría de Salud (2021), “Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, *Diario Oficial de la Federación*, Ciudad de México.