

BIORREMEDIACIÓN BACTERIANA DEL ARSÉNICO: MECANISMOS DE ÓXIDO REDUCCIÓN

BACTERIAL BIORREMEDIATION OF THE ARSENIC: REDUCTION OXID MECHANISMS

Angela Veronica Choque Miranda²³

RESUMEN

La contaminación por arsénico (As) de las diferentes fuentes de agua y los suelos representa una amenaza para la salud de las personas y el desarrollo de la biodiversidad en el planeta. Las formas más frecuentes y más tóxicas de arsénico en la naturaleza son el arseniato (V) y el arsenito (III), siendo este último el más móvil y tóxico.

Como se sabe, para poder lograr una remoción efectiva del arsénico de un ambiente contaminado, se debe tener en cuenta que un método adecuado será el que además de removerlo o transformarlo será respetuoso del ambiente, lo que quiere decir que no debe provocar la formación de nuevos contaminantes y debe ser factible en cuanto a costos para su factibilidad.

El arsénico es reconocido como un elemento tóxico para muchos organismos vivos, en la actualidad se sabe que también existen microorganismos como las bacterias que se encuentran en ambientes con altas concentraciones de arsénico, tolerando y utilizando al arsénico para su metabolismo, lo que permite como consecuencia su remoción y con ello la destoxificación del ambiente contaminado de forma saludable. Es por tal razón que esta revisión bibliográfica tiene por finalidad dar a conocer y explicar la comprensión de los mecanismos de óxido reducción que emplean las bacterias no solo para tolerar elevadas concentraciones, sino además para destoxificar un ambiente contaminado con arsénico.

ABSTRACT

Arsenic contamination (As) of different water sources and soils represents a threat to the health of people and the development of biodiversity on the planet. The most frequent and most toxic forms of arsenic in nature are arsenate (V) and arsenite (III), the latter being the most mobile and toxic.

As is known, in order to achieve an effective removal of arsenic from a contaminated environment, it must be taken into account that an adequate method will be the one that

²³ Maestro en Ciencia y Tecnología de Alimentos

Docente de la Facultad de Ciencias Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann – Tacna
Perú

in addition to removing or transforming it will be respectful of the environment, which means that it should not cause the formation of arsenic. new pollutants and should be feasible in terms of costs for its feasibility.

Arsenic is recognized as a toxic element for many living organisms, nowadays it is known that there are also microorganisms such as bacteria that are found in environments with high concentrations of arsenic, tolerating and using arsenic for their metabolism, which allows as a consequence its removal and with it the detoxification of the contaminated environment in a healthy way. It is for this reason that this literature review aims to publicize and explain the understanding of the mechanisms of oxide reduction used by bacteria not only to tolerate high concentrations, but also to detoxify an environment contaminated with arsenic.

INTRODUCCIÓN

El arsénico (As) es un metaloide, que puede encontrarse en la naturaleza bajo dos formas de oxidación (más frecuentes): el Arsenito (III) y el arseniato(V); siendo el primero el más tóxico para la salud de las personas. Es precisamente a este tipo de arsénico (Arsenito) que están dirigidos la mayoría de trabajos reportados en la literatura científica, en donde su principal objetivo es la remoción de este metaloide por diferentes métodos físicos, químicos y biológicos. Así mismo es importante mencionar que para lograr la remoción del Arsénico por métodos físicos y químicos, es necesario una etapa previa en donde el Arsenito (III) es oxidado a su forma Arseniato (V), ya que este último presenta carga negativa y por ello es más fácil su remoción. (Yamamura & Amachi, 2014).

En la actualidad los diversos métodos físico-químicos presentan ventajas, desventajas y limitaciones lo que no asegura un resultado técnico, económico y ambiental. Entre los procesos y/o métodos de remediación están la oxidación, precipitación, coagulación y ablandamiento con cal, ósmosis inversa, microfiltración, nanofiltración, adsorción, tratamientos biológicos y fitorremediación, electrodiálisis y electrocinética, entre otros. (Carro Perez Magalí E. & Francisca Franco M., 2013).

Sin embargo debemos mencionar que si bien los métodos de remediación diferentes

de los biológicos, reportan gran efectividad de remoción como por ejemplo valores de 80 a 95% aplicando procesos de coagulación y floculación (Francisca & Carro Pérez, 2014) o alrededor del 88% a través de oxidación solar (bajo una irradiación solar promedio de 586 W-h/m²) (Quijada, Luz, & Miglio Toledo, 2011) y un 96.5% de remoción empleando métodos de adsorción con roca caliza (Flores, Armienta, Micete, & Valladares, 2009) por mencionar algunos.

Los métodos biológicos a diferencia de los fisicoquímicos no alcanzan altos porcentajes de remoción sin embargo tienen la ventaja de ser saludables con el ambiente ya que estos se fundamentan en aprovechar el potencial metabólico de organismos vivos (bacterias, hongos y plantas) para limpiar ambientes contaminados. (Covarrubias, García Berumen, & Peña Cabriales, 2015). Los métodos biológicos son conocidos también como Biorremediación, los que se caracterizan por ofrecer una alta especificidad mediante mecanismos de bioadsorción, bioprecipitación, biolixiviación y biovolatilización, muchas veces transformando los metales a formas no tóxicas, suelen ser más económicos y seguros que las tecnologías convencionales (Okeke, 2008)

Las transformaciones redox de As son de gran importancia para predecir su destino en el medio ambiente, así como para lograr la

remediación de aguas y suelos contaminados por este metaloide. Los microorganismos pueden mediar las transformaciones redox de As a través de la reducción de arsénico (V) y oxidación de arsénico (III). (Oremland & Stolz, 2003). Hasta la fecha, una amplia variedad de procariotas que reducen el As (V) y oxidan el As (III) se han aislado de ambientes contaminados con arsénico. (Oremland & Stolz, 2003; Oremland & Stolz, 2005).

Aunque el arsénico ha sido reconocido como un elemento tóxico, una amplia variedad de microorganismos, principalmente bacterias, pueden usarlo como un electrón donante para el crecimiento autotrófico o como un aceptor de electrones para la respiración anaeróbica. Además, los sistemas de destoxificación de arsénico, en los que el arsénico se oxida a la forma menos tóxica o se reducen para la posterior excreción, se distribuyen ampliamente en los microorganismos. (Yamamura & Amachi, 2014).

Teniendo en consideración la importancia de la remoción de arsénico con métodos que sean favorables y saludables para el ambiente, la presente revisión bibliográfica tiene por finalidad dar a conocer y facilitar la comprensión de los mecanismos de óxido reducción que emplean las bacterias no solo para tolerar elevadas concentraciones, sino además para desintoxicar un ambiente contaminado con arsénico.

Bacterias que metabolizan arsénico

Varios grupos de organismos taxonómicamente diversos son capaces de metabolizar el arsénico de forma natural. Este gran grupo de bacterias que respiran arsénico se distribuyen entre α , β , γ y ϵ -Proteobacterias, bacterias Gram positivas bajas en G+C (también denominadas Firmicutes) y Crenarchaea (Oremland, Stolz, & Hollibaugh, 2004). Dichas bacterias metabolizadoras de arsénico se pueden

clasificar en (i) Organismos oxidantes de arsenito y (ii) Organismos reductores de arseniato. Se ha demostrado que estos dos grupos de organismos son capaces de coexistir en el medio ambiente y son indicativos del hecho de que la transformación microbiana desempeña un papel importante en el proceso de especiación del arsénico (Oremland & Stolz, 2003; Macur, Jackson, Botero, Mcdermott, & Inskeep, 2004).

La absorción de arsénico por las células bacterianas

En los microorganismos que metabolizan arsénico no se encuentra un sistema dedicado a la captación de arsénico en forma exclusiva (Fig 1). Sin embargo, el metal tóxico gana entrada a la célula a través de transportadores existentes, debido a su analogía estructural con otras moléculas esenciales (Rosen & Liu, 2009). La similitud estructural entre el arseniato y el fosfato facilita a los organismos absorber arseniato a través de transportadores de fosfato, mientras que el arsenito gana la entrada a través de aquagliceroporinas que está principalmente destinado a conducir solutos orgánicos tales como urea y glicerol. Estudios en *Escherichia coli* confirman que los transportadores de fosfato pentavalente, concretamente Pit (transporte inorgánico de fosfato) y Pst (transporte específico de fosfato) están implicados en el transporte de arseniato a la célula microbiana, (Silver & Phung, 2005a; Silver & Phung, 2005b). Pit es una proteína transmembrana totalmente constitutiva y la absorción de iones es impulsada por la fuerza motriz del protón que realiza un flujo bidireccional de iones divalentes. El sistema Pit es también responsable de catalizar un intercambio de fosfato intracelular por fosfato o arseniato extracelular. Pst es una proteína transportadora periplásmica. Los estudios han identificado que Pit es la principal proteína de captación, mientras que Pst transporta arseniato de manera menos eficiente y ha

demostrado una inhibición concurrente del transporte de fosfato en presencia de arseniato (Rosen & Liu, 2009).

El arsenito ingresa a la célula a través de transportadores de glicerol, GlpF, en bacterias, levaduras y mamíferos (Tsai, Singh, & Chen, 2009). El mecanismo del transporte de arsenito a través de GlpF ha sido identificado y explicado en *E. coli*. En donde las GlpF, son canales que están principalmente involucrados en el transporte de ácidos orgánicos y urea. Sin embargo, también pueden facilitar el transporte de As (III) y Sb (III). (Meng, Liu, & Rosen, 2004). Se postula que el arsenito sólido en forma de As_2O_3 se disuelve al pH ambiental existente, convirtiéndolo en $As(OH)_3$ soluble y es transportado por el facilitador de glicerol, GlpF (Rosen & Liu, 2009)

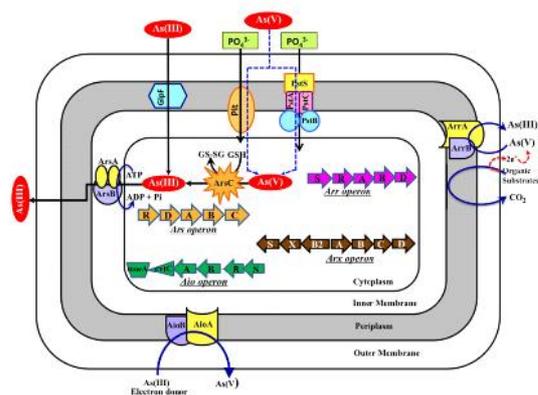


Fig 1: Representación esquemática de los procesos redox microbianos que tienen lugar en los procariontes metabolizadores del arsénico.

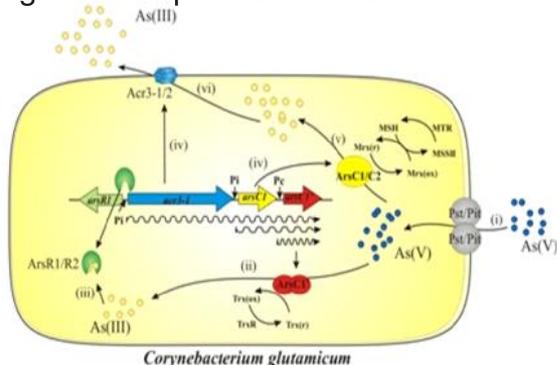
El arsénico gana entrada en la célula como (i) Arsenito, As (III) en su forma de hidróxido [$As(OH)_3$] a través de una aquagliceroporina (GlpF), que es un facilitador de glicerol o como (ii) Arseniato, As (V) a través de las proteínas de captación de fosfato, pit y pst. Una vez dentro del citoplasma celular, el arseniato se reduce a arsenito mediante una pequeña enzima soluble arseniato reductasa (ArsC) en la que el glutatión (GSH) sirve como donante de electrones. ArsAB codifica la proteína de extrusión dependiente de ATP, facilitando la expulsión del arsenito de la célula.

Procesos microbianos para la reducción de arseniato

Los procesos mediados por microbios que producen la reducción del arseniato son importantes desde el punto de vista ambiental, ya que producen un cambio en el estado de oxidación que conduce a una forma más móvil y tóxica en los sistemas acuáticos. Los organismos reductores de arseniato se clasifican en (i) **Microorganismos reductores de arseniato (ARM)**, que reducen el As (V) como medio de desintoxicación. No obtienen energía de este proceso, sino que llevan a cabo este proceso para posibilitar la supervivencia en áreas donde la concentración de arsénico es demasiado alta. El proceso de desintoxicación, involucra tres pasos clave (Fig 2), es decir, absorción de arsénico como arseniato por los transportadores de fosfato principalmente Pit y Pst, reducción de As (V) a As (III) y expulsión o secuestro de As (III) a través de la proteína de extrusión (Rosen, 2002), (Villadangos et al., 2011). Así mismo es importante mencionar que la enzima arseniato reductasa (ArsC) cataliza la reducción de As (V) a As (III) (Silver & Phung, 2005a) y que esta se encuentra codificada en el operon ARS, quien es el responsable de proporcionar la tolerancia al arsénico, que puede encontrarse en bacterias gram positivas y gram negativas (Rosen, 2002). (ii) **Los procariontes reductores de arseniato disasimilatorios (DARPs)** pertenecen a un grupo filogenético diverso, que comprende a b-, g-, ε- Proteobacteria y Crenarchaeota, algunos de ellos han sido identificados en la tabla 1.-(Kumari & Jagadevan, 2016).

En las DARPs, el As (V) actúa como un aceptor de electrones y la reducción de arseniato se lleva a cabo a fuera coincidiendo con la oxidación de sustancias inorgánicas y orgánicas

conduciendo a la generación de energía. Las DARPs Son capaces de utilizar donantes de electrones como H₂ inorgánico, ácidos orgánicos, azúcares y algunos compuestos aromáticos.



Fuente: Elaboración propia

Fig. 2. Modelo de resistencia a arsénico en C. glutamicum.

(i) Entrada de arseniato [As(V)]; (ii) expresión constitutiva de la proteína ArsC1 y reducción de As(V) a arsenito [As(III)]; (iii) unión de As(III) a los reguladores (ArsR1/R2) y desrepresión del operón ars; (iv) transcripción de los genes que codifican para las arseniato reductasas (ArsC1/C2/C1'); (v) reducción de As(V) por reductasas ArsC1 y ArsC2 usando el sistema MSH/Mrx1 y (vi) liberación de As(III) formado en la célula a través de las arsenito permeasas Acr3-1/2. (Villadangos et al., 2011).

Tabla 1: Procariontes reductores de arseniato disasimilatorios. —(Kumari & Jagadevan, 2016)

Organism	Taxonomy	Electron donor	Reference
1. <i>Sulfospirillum arsenophilum</i> str. MT-13	α-Proteobacteria	Lactate	Ahmann et al., 1994, Stolz et al., 1999.
2. <i>Sulfospirillum barnesii</i> str. SES-3	α-Proteobacteria	Lactate, pyruvate or hydrogen and acetate	Oremland et al., 1994, Stolz et al., 1999
3. <i>Bacillus arseniselenatis</i> str. EIH	Low G+C of gram positive bacteria	Lactate	Blum et al., 1998
4. <i>Bacillus selenitrodans</i> str. MIS10	Low G+C of Gram Positive bacteria	Lactate	Blum et al., 1998
5. <i>Desulfotomaculum auripigmentum</i> str. OREX-4	Low G+C of gram positive bacteria	Lactate	Newman et al., 1997
6. <i>Desulfotomaculum</i> sp. str. Ben-RB	β-Proteobacteria		Macy et al., 2000
7. <i>Chrysiogenes arsenatis</i>	New phylum	lactate	Macy et al., 1996
8. <i>Pyrobaculum arsenicum</i>	Archaea	acetate	Huber et al., 2000
9. <i>Pyrobaculum aerophilum</i>	Archaea	Hydrogen	Huber et al., 2000
10. <i>Desulfobacterium</i>	Firmicutes (low G+C of gram positive bacteria)	hydrogen formate	Niggemeyer et al., 2001
11. Termite isolate (strain TSA-1)			Hebel et al., 2002
Rumen isolate (strain BRA-1)		Hydrogen	
Hamster isolate (strain HT-1)			
12. <i>Bacillus mayae</i> JMM-4	Low G+C of gram positive bacteria		Santini and vanden Hoven 2004
13. <i>Desulfosporosium</i> sp. Strain Y5	Low G+C of gram positive bacteria	Acetate	Liu et al., 2004, Perez-Jimenez et al., 2005
14. <i>Bacillus selenatensis</i> SF-1	Low G+C of gram positive bacteria	Lactate, succinate H ₂ +CO ₂ , aromatic compounds (phenol, benzoate, syringic acid)	fujita et al., 1997, Yamamura et al., 2003, 2007
15. <i>Bacillus selenatensis</i> SF-1	Deinococci	Lactate, organic compounds and synthetic sewage (peptone and meat extract)	Gilring and Banfield, 2001
16. <i>Shewanella</i> ANA-3	γ-Proteobacteria	Lactate	Sidlikov et al., 2005
17. <i>Desulfaromonas</i> WB3	β-Proteobacteria	acetate	Osborne et al., 2015

Fuente: Elaboración propia

Procesos microbianos para la oxidación de arsenito

Una amplia variedad de microorganismos pertenecientes a nueve géneros entre alfa, beta y gama proteobacterias son capaces de oxidar enzimáticamente arsenito a una forma de arseniato menos tóxica, han sido identificadas en diversos hábitats. Entre estos, *Alcaligenes faecalis* es el organismo oxidante de arsenito más estudiado (Silver & Phung, 2005a). Dependiendo de sus sustratos de crecimiento preferidos, los organismos oxidantes de arsenito (AOO) pertenecientes a las Bacterias y Archaeas se clasifican además en dos tipos: (i) **Bacterias oxidantes de arsenito heterotróficas (HAOs)**, Los oxidantes de arsenito heterotróficos requieren materia orgánica para su crecimiento y no extraen energía del proceso de oxidación del arsenito, pero generalmente son un medio de desintoxicación para el microorganismo durante la respiración aeróbica (Oremland & Stolz, 2003; Vanden Hoven & Santini, 2004; Stolz, Basu, & Oremland, 2010). La Tabla 2 enlista varios HAOs aislados de diversos hábitats junto con una breve descripción de sus funciones metabólicas. (ii) **Bacterias oxidantes de arsenito quimiolithoautotrófica (CAO)**, Las bacterias quimiolithoautotróficas pueden ser aerobios o anaerobios y solo dependen del dióxido de carbono como su fuente de carbono. El arsenito sirve como donador de electrones en la respiración celular, reduciendo así el oxígeno o el nitrato. Una bacteria aerobia gram negativa NT-26, perteneciente a la rama de las alfa-Proteobacteria *Agrobacterium/Rhizobium*, aislada de una mina de oro en Australia (Santini, Sly, Schnagl, & Macy, 2000) y una anaerobia facultativa MLHE-1, una gama-proteobacteria, propuesta más

adelante como *Alkalilimnicola ehrlichii* sp. nov. aisladas de Mono lake USA (Oremland et al., 2002; Hoefft et al., 2007), son dos especies bien estudiadas que pertenecen a esta categoría. MLHE-1 puede emplear nitrato como su aceptor de electrones terminal y As (III) sirve como su donante de electrones en condiciones anaeróbicas. De manera similar, *Ectothiorhodospira sp* PHS-1, una bacteria purpura del azufre aislada de biopelículas pigmentadas en rojo en Mono Lake también posee la capacidad de producir As (V) de forma anaeróbica utilizando As (III) como sustrato para la fotosíntesis anoxigénica (Kulp et al., 2008). En la Tabla 3 se tiene una lista de CAO con una breve descripción de su mecanismo de oxidación de arsenito.

Tabla 2: Bacterias oxidantes de arsenito heterotróficas (HAOs) — (Kumari & Jagadevan, 2016)

Organism	Taxonomy	Mechanism
1. <i>Ochromobacter tritici</i> SC124	α -Proteobacterium	Strain is able to oxidize arsenite in presence of organic matter like yeast extract.
2. <i>Alcaligenes faecalis</i>	β -Proteobacterium	Oxidises arsenite to arsenate and require nitrate or ammonium.
3. <i>Herminimonas arsenoxydans</i> str. UJPA 51	β -proteobacterium	Strain is able to reduce nitrate to nitrite, oxidises arsenite to arsenate using acetate, lactate and peptone as organic carbon sources aerobically.
4. <i>Thermus HR13</i>	Deinococci	Rapid oxidation of inorganic As(III) to As(V) under aerobic condition and dissimilatory reduction under anaerobic conditions with lactate oxidation.
5. <i>Thermus thermophilus</i> HB8	Deinococci	Rapid arsenite oxidation but unable to grow with arsenite as sole energy source.
6. <i>Hydrogenophaga NT-14</i>	β -proteobacterium	Arsenite oxidation coupled with reduction of oxygen appears to be responsible for providing energy for growth.
7. <i>Agrobacterium tumefaciens</i>	Alpha-proteobacterium	Heterotrophic arsenite oxidation.
8. <i>Stenotrophomonas sp.</i> MM-7	Gamma-proteobacteria	Strain grows and oxidize arsenite using glucose, maltose, fructose, mannitol, sucrose and dextrose as sole carbon source for detoxification.
9. <i>Azoarcus</i> strain DAO1 <i>Sinorhizobium</i> strain DAO10	-	Anaerobic arsenite oxidation with nitrate as electron acceptor and inorganic carbon as carbon source.

Tabla 3: Bacterias oxidantes de arsenito quimiolitotróficas (CAO) —(Kumari & Jagadevan, 2016)

Organism	Isolated from	Taxonomy	Mechanism of oxidizer
1. <i>Thiobacillus</i> NT-6	Gold mine in the northern territory of Australia	Agrobacterium/Thiobacillus Sulfidobacteriales	Aerobic acts as a chemolitho autotrophic organism. Oxidizes arsenite to arsenate using oxygen as electron acceptor and carbon dioxide as substrate as the sole carbon source. Chemolithoautotrophic growth. Arsenite is grown aerobically with arsenite or thiosulfate as electron acceptor.
2. <i>Thiobacillus</i> 345	Isolated from religious Spring, Cambrils, Gaud, Tarragona	Thiobacillus genus of Thiobacteriales	Chemolithoautotrophic growth. Arsenite is grown aerobically with arsenite or thiosulfate as electron acceptor.
3. <i>Strophomonas</i> diazotrophica As 3-43	Isolated from a rhizosphere of <i>Agave</i> in a soil, Tuscany, Italy	β -proteobacterium	Chemolithoautotrophic growth. Arsenite is grown aerobically with arsenite or thiosulfate as electron acceptor. Chemolithoautotrophic growth. Arsenite is grown aerobically with arsenite or thiosulfate as electron acceptor.
4. <i>Thiobacillus</i> oshimizuensis strain 25 (previously identified as strain of <i>Thiobacillus</i> <i>ferrooxidans</i>)	Isolated from As(III) oxidizing mixed population (soil) CAO1; obtained from Chemnitz district mine site in France	Genus Thiobacillus of the Sulfidobacteriales of the Proteobacteria	Chemolithoautotrophic growth. Arsenite is grown aerobically with arsenite or thiosulfate as electron acceptor.
5. <i>Alkalilimnicola ehrlichii</i> MLHE-1	Isolated from Mono Lake an alkaline hypersaline soda lake in California, USA	Genus Ectothiorhodospira of β -proteobacterium	Aerobic growth with inorganic electron acceptor. Chemolithoautotrophic growth. Arsenite is grown aerobically with arsenite or thiosulfate as electron acceptor.
6. <i>Thiobacillus</i> sp. 58	-	-	Chemolithoautotrophic growth. Arsenite is grown aerobically with arsenite or thiosulfate as electron acceptor.

CONCLUSIONES

- La biorremediación bacteriana es una alternativa saludable para el ambiente ya que no genera formación de compuestos secundarios durante el proceso de transformación y/o degradación del arsénico
- Las bacterias juegan un rol importante en la especiación del arsénico en el ambiente, ya que pueden oxidar y reducir al arsénico.
- Los mecanismos de biotransformación del arsénico por bacterias se fundamentan en la capacidad de las bacterias para oxidar y/o reducir al arsénico
- Las reacciones bioquímicas para la oxidación/reducción del arsénico es catalizada por enzimas bacterianas: arsenito oxidasa y arseniato reductasa
- La biotransformación del arsénico por parte de las bacterias se puede realizar en condiciones aeróbicas y anaeróbicas
- La capacidad biotransformativa que poseen las bacterias permite la destoxificación de un ambiente contaminado con arsénico, gracias a su capacidad metabólica

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carro Perez Magali E., & Francisca Franco M. (2013). Arsenic Entrapment in Reactive Columns of Residual Soils. *Journal of Environmental Engineering*, 139(6), 788-795. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000697](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000697)
- Covarrubias, S. A., García Berumen, J. A., & Peña Cabriales, J. J. (2015). El papel de los microorganismos en la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados. *Acta Universitaria*, 25(3). Recuperado de <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=41648311004>
- Flores, E., Armienta, A., Micete, S., & Valladares, M. R. (2009). Tratamiento de Agua para Consumo Humano con Alto

Contenido de Arsénico: Estudio de un Caso en Zimapán Hidalgo-México. *Información tecnológica*, 20(4), 85-93.
<https://doi.org/10.4067/S0718-0764200900400010>

Francisca, F. M., & Carro Pérez, M. E. (2014). Remoción de arsénico en agua mediante procesos de coagulación-floculación. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(2), 177-190.

Hoefl, S. E., Blum, J. S., Stolz, J. F., Tabita, F. R., Witte, B., King, G. M., ... Oremland, R. S. (2007). *Alkalilimnicola ehrlichii* sp. nov., a novel, arsenite-oxidizing haloalkaliphilic gammaproteobacterium capable of chemoautotrophic or heterotrophic growth with nitrate or oxygen as the electron acceptor. *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 57(3), 504-512.

Kulp, T. R., Hoefl, S. E., Asao, M., Madigan, M. T., Hollibaugh, J. T., Fisher, J. C., ... Oremland, R. S. (2008). Arsenic (III) fuels anoxygenic photosynthesis in hot spring biofilms from Mono Lake, California. *Science*, 321(5891), 967-970.

Kumari, N., & Jagadevan, S. (2016). Genetic identification of arsenate reductase and arsenite oxidase in redox transformations carried out by arsenic metabolising prokaryotes – A comprehensive review.

Chemosphere, 163, 400-412.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.044>

Macur, R. E., Jackson, C. R., Botero, L. M., Mcdermott, T. R., & Inskeep, W. P. (2004). Bacterial Populations Associated with the Oxidation and Reduction of Arsenic in an Unsaturated Soil. *Environmental Science & Technology*, 38(1), 104-111.
<https://doi.org/10.1021/es034455a>

Meng, Y.-L., Liu, Z., & Rosen, B. P. (2004). As(III) and Sb(III) Uptake by GlpF and Efflux by ArsB in *Escherichia coli*. *Journal of Biological Chemistry*, 279(18), 18334-18341.
<https://doi.org/10.1074/jbc.M400037200>

Okeke, B. C. (2008). Bioremoval of hexavalent chromium from water by a salt tolerant bacterium, *Exiguobacterium* sp. GS1. *Journal of industrial microbiology & biotechnology*, 35(12), 1571-1579.

Oremland, R. S., Hoefl, S. E., Santini, J. M., Bano, N., Hollibaugh, R. A., & Hollibaugh, J. T. (2002). Anaerobic oxidation of arsenite in Mono Lake water and by a facultative, arsenite-oxidizing chemoautotroph, strain MLHE-1. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(10), 4795-4802.

Oremland, R. S., & Stolz, J. F. (2003). The Ecology of Arsenic. *Science*, 300(5621), 939-944
<https://doi.org/10.1126/science.1081903>

Oremland, R. S., & Stolz, J. F. (2005). Arsenic, microbes and contaminated aquifers. *Trends in Microbiology*, 13(2), 45-49.
<https://doi.org/10.1016/j.tim.2004.12.002>

Oremland, R. S., Stolz, J. F., & Hollibaugh, J. T. (2004). The microbial arsenic cycle in Mono Lake, California. *FEMS Microbiology Ecology*, 48(1), 15-27.
<https://doi.org/10.1016/j.femsec.2003.12.016>

Quijada, C., Luz, M., & Miglio Toledo, M. (2011). Remoción de arsénico por oxidación solar en aguas para consumo humano. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 77(4), 307-314. Recuperado de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1810-634X2011000400008&lng=es&nrm=iso&tln=es

Rosen, B. P. (2002). Biochemistry of arsenic detoxification. *FEBS Letters*, 529(1), 86-92.
[https://doi.org/10.1016/S0014-5793\(02\)03186-1](https://doi.org/10.1016/S0014-5793(02)03186-1)

Rosen, B. P., & Liu, Z. (2009). Transport pathways for arsenic and selenium: A minireview. *Environment International*, 35(3), 512-515.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.07.023>

Santini, J. M., Sly, L. I., Schnagl, R. D., &

- Macy, J. M. (2000). A new chemolithoautotrophic arsenite-oxidizing bacterium isolated from a gold mine: phylogenetic, *Chemosphere*, 163, 400-412. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.044>
- Macur, R. E., Jackson, C. R., Botero, L. M., Mcdermott, T. R., & Inskeep, W. P. (2004). Bacterial Populations Associated with the Oxidation and Reduction of Arsenic in an Unsaturated Soil. *Environmental Science & Technology*, 38(1), 104-111. <https://doi.org/10.1021/es034455a>
- Meng, Y.-L., Liu, Z., & Rosen, B. P. (2004). As(III) and Sb(III) Uptake by GlpF and Efflux by ArsB in Escherichia coli. *Journal of Biological Chemistry*, 279(18), 18334-18341. <https://doi.org/10.1074/jbc.M400037200>
- Okeke, B. C. (2008). Bioremoval of hexavalent chromium from water by a salt tolerant bacterium, *Exiguobacterium* sp. GS1. *Journal of industrial microbiology & biotechnology*, 35(12), 1571-1579.
- Oremland, R. S., Hoefft, S. E., Santini, J. M., Bano, N., Hollibaugh, R. A., & Hollibaugh, J. T. (2002). Anaerobic oxidation of arsenite in Mono Lake water and by a facultative, arsenite-oxidizing chemoautotroph, strain MLHE-1. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(10), 4795-4802.
- Oremland, R. S., & Stolz, J. F. (2003). The Ecology of Arsenic. *Science*, 300(5621), 939-944. <https://doi.org/10.1126/science.1081903>
- Oremland, R. S., & Stolz, J. F. (2005). Arsenic, microbes and contaminated aquifers. *Trends in Microbiology*, 13(2), 45-49. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2004.12.002>
- Oremland, R. S., Stolz, J. F., & Hollibaugh, J. T. (2004). The microbial arsenic cycle in Mono Lake, California. *FEMS Microbiology Ecology*, 48(1), 15-27. <https://doi.org/10.1016/j.femsec.2003.12.016>
- Quijada, C., Luz, M., & Miglio Toledo, M. (2011). Remoción de arsénico por oxidación solar en aguas para consumo humano. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 77(4), 307-314. Recuperado de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1810-634X2011000400008&lng=es&nrm=iso&tln g=es
- Rosen, B. P. (2002). Biochemistry of arsenic detoxification. *FEBS Letters*, 529(1), 86-92. [https://doi.org/10.1016/S0014-5793\(02\)03186-1](https://doi.org/10.1016/S0014-5793(02)03186-1)
- Rosen, B. P., & Liu, Z. (2009). Transport pathways for arsenic and selenium: A minireview. *Environment International*, 35(3), 512-515. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.07.023>
- Santini, J. M., Sly, L. I., Schnagl, R. D., & Macy, J. M. (2000). A new chemolithoautotrophic arsenite-oxidizing bacterium isolated from a gold mine: phylogenetic,