

Dinámica del azufre en el sistema suelo-planta y las transformaciones microbianas asociadas: una revisión

Sulfur dynamics in the soil-plant system and associated microbial transformations: a review

Recepción del artículo: 21/03/2026 • Aceptación para publicación: 24/04/2026 • Publicación: 01/05/2026

Carlos Alberto Velázquez-Sanabria

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2623-5313>

Irving Oswaldo Velázquez-Ríos*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7964-6167>

Fredy Delgado-Ruiz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7632-7104>

Francisco Guevara-Hernández

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1444-6324>

Universidad Autónoma de Chiapas. Facultad de Ciencias Agronómicas. Villaflores, Chiapas, México.

*Autor para correspondencia:

irving.velazquez@unach.mx

Resumen

El azufre (S) es un elemento clave en los ciclos biogeoquímicos, el cual se presenta en diferentes estados de oxidación, generando una especiación química y un complejo ciclo del azufre. En el suelo, se encuentra en forma inorgánica y orgánica, siendo esta última la más predominante hasta en un 95%. Sin embargo, la forma principal asimilable para las plantas es a través del sulfato. Las transformaciones de este elemento están mediadas por reacciones de oxidación y reducción, así como por procesos de mineralización, regulando así su disponibilidad en el sistema suelo-planta. El sulfato asimilado por las plantas es utilizado en la síntesis de biomoléculas esenciales como aminoácidos y compuestos relacionados con mecanismos de defensa. En este sentido, diversas investigaciones han demostrado que bacterias oxidadoras de azufre presentes en el suelo pueden incrementar la disponibilidad de este nutriente y mejorar la absorción de elementos como nitrógeno, favoreciendo así el crecimiento vegetal. Asimismo, su aplicación en conjunto con otros microorganismos promotores del crecimiento vegetal ha mostrado efectos positivos en el rendimiento de distintos cultivos, lo que resalta su potencial como estrategia biotecnológica para el manejo sostenible de la fertilidad del suelo. El objetivo de la presente revisión es proporcionar una visión integral en la dinámica de azufre en el sistema suelo-planta, destacando las transformaciones microbianas, así como su importancia y disponibilidad en la nutrición vegetal y manejo sostenible del suelo.

Palabras clave: Ciclo del azufre, Bacterias oxidadoras de azufre, mineralización, fertilidad del suelo.

Abstract

Sulfur (S) is a key element in biogeochemical cycles, occurring in different oxidation states, generating chemical speciation and a complex sulfur cycle. In soil, this element is found in inorganic and organic forms, with the latter predominating, reaching up to 95%. However, the main form available to plants is sulfate. The S-transformations are mediated by oxidation and reduction reactions, as well as mineralization processes, thus regulating its availability in the soil-plant system. Sulfate assimilated by plants is used in the synthesis of essential biomolecules such as amino acids and compounds related to defense mechanisms. In this regard, various studies have shown that sulfur-oxidizing bacteria present in the soil can increase the availability of this nutrient and improve the absorption of elements such as nitrogen, thereby promoting plant growth. Furthermore, its application in conjunction with other plant growth-promoting microorganisms has shown positive effects on the yield of various crops, highlighting its potential as a biotechnological strategy for the sustainable management of soil fertility. The objective of this review is to provide a comprehensive overview of sulfur dynamics in the soil-plant system, emphasizing microbial transformations, as well as its importance and availability in plant nutrition and sustainable soil management.

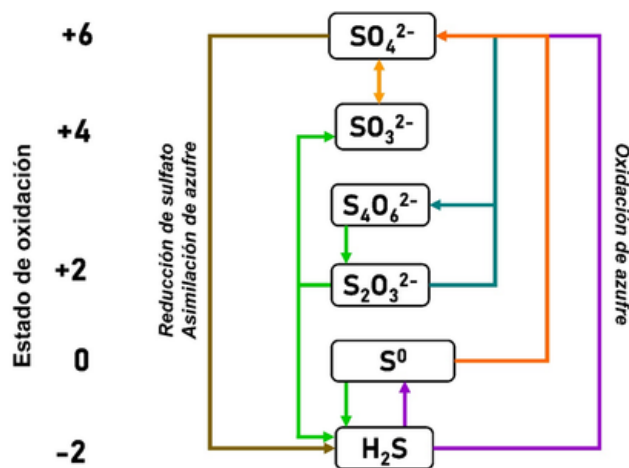
Keywords: Sulfur cycle, Sulfur-oxidizing bacteria, Mineralization, Soil fertility.

Introducción

El azufre (S) es uno de los elementos más abundantes en el universo y ha desempeñado un papel fundamental en procesos geológicos y biológicos. Una de las propiedades químicas más relevantes de este elemento es la variedad de estados de oxidación en los que se puede presentar, lo cual da origen una especiación química y un complejo ciclo biogeoquímico del S (Canfield y Farquhar, 2012; Fike *et al.*, 2015).

El azufre puede presentarse en el suelo en un amplio rango de estados de oxidación. La forma más oxidada es el sulfato (SO_4^{2-}), con estado de oxidación de +6, sulfito (SO_3^{2-}) con +4, así como compuestos intermedios como el tiosulfato ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$) y el tetrationato ($\text{S}_4\text{O}_6^{2-}$), en los cuales los átomos de azufre presentan estados de oxidación con valor de +2 (Figura 1) (Fike *et al.*, 2015; Ayala-Muñoz *et al.*, 2022). Asimismo, el azufre puede encontrarse en su forma elemental (S^0) con estado de oxidación 0, mientras que las formas más reducidas corresponden al sulfuro de hidrógeno (H_2S) o bisulfuro (HS^-), donde el azufre presenta un estado de oxidación de -2 (Figura 1) (Fike *et al.*, 2015; Ayala-Muñoz *et al.*, 2022).

Figura 1. Principales estados de oxidación del azufre. Modificado de Ayala-Muñoz *et al.*, 2022.



Desde el punto de vista biológico el S es indispensable en los tres dominios de la vida (Bacteria, Archaea y Eukarya), ya que forma parte de biomoléculas clave como aminoácidos, proteínas, sulfolípidos y cofactores. Estos compuestos se sintetizan mediante procesos metabólicos asimilatorios, donde son asimilados e incorporados a la formación de biomasa, principalmente en forma de sulfuro (Klotz *et al.*, 2011; Fike *et al.*, 2015). La capacidad de los organismos para transformar diferentes compuestos azufrados genera una especiación de este elemento, donde los microorganismos juegan un papel importante a través de reacciones de oxidación y reducción (Klotz *et al.*, 2011; Jørgensen *et al.*, 2019).

Las transformaciones de S mediadas por bacterias y arqueas, han tenido un impacto en las propiedades de la biosfera y siguen siendo un factor determinante en los procesos biogeoquímicos actuales (Klotz *et al.*, 2011; Jørgensen *et al.*, 2019).

En ecosistemas terrestres, el suelo representa uno de los escenarios principales de las transformaciones biológicas de azufre mediadas por procariotas, donde regulan procesos de oxidación, reducción y mineralización, especialmente en microambientes como la rizosfera (Chaudhary *et al.*, 2023). El estado de oxidación del S en el suelo determina su disponibilidad para la absorción de las plantas, la cual está influenciada por procesos pedogénicos y factores fisicoquímicos (Chaudhary *et al.*, 2023).

Aunque el azufre es un elemento esencial para el desarrollo vegetal, el estudio sobre la dinámica, movimiento y especiación de este elemento es limitado, debido a que su aporte en los sistemas agrícolas se ha garantizado principalmente mediante fertilizantes comerciales (Santana *et al.*, 2021). La creciente demanda en la producción de alimentos aumenta el rendimiento de los cultivos, favoreciendo la producción de biomasa y con ello, un incremento en la absorción de S. No obstante, el uso de insumos agrícolas que no contienen azufre, aunado a la reducción de aportes atmosféricos de este elemento, genera deficiencias de S en sistemas agrícolas, donde la demanda por los cultivos supera los aportes de este elemento al suelo (Santana *et al.*, 2021). Ante esta limitación, generalmente se agrega S-inorgánico al suelo, sin embargo, es susceptible a procesos de lixiviación, adherencia la superficie de minerales del suelo como óxidos de Fe y Al, así como su incorporación a la materia orgánica (Santana *et al.*, 2021). En este sentido, comprender los procesos que regulan la transformación y disponibilidad del azufre en el suelo resulta fundamental para el manejo sostenible de este nutriente en los sistemas agrícolas.

Reservorios de azufre en el suelo

El mayor reservorio de azufre en la Tierra se encuentra en la litosfera, con cerca de 2.4×10^{19} kg, donde 2.6×10^{14} kg se encuentran en la pedosfera, en menor proporción se localizan en la hidrosfera (1.3×10^{18} kg), la pedosfera (2.6×10^{14} kg) y la atmósfera (4.8×10^9 kg) (Lens, 2009; Chaudhary *et al.*, 2023).

Azufre orgánico

El azufre (S) del suelo existe en formas orgánicas e inorgánicas (Chaudhary *et al.*, 2023), la mayor proporción total se encuentra en forma orgánica (hasta el 95% unido a moléculas orgánicas), principalmente en los horizontes superiores (Li *et al.*, 2022). Aunque el S

orgánico no se encuentra fácilmente accesible, representa un suministro importante de S para las plantas en condiciones de déficit de este elemento (Li *et al.*, 2022).

En el suelo, los aminoácidos cisteína y metionina son moléculas orgánicas de bajo peso molecular que sirven como fuente de azufre. Una enzima clave involucrada en la liberación de H₂S a partir de la cisteína es la cisteína desulfhidrasa (Ruckert, 2016, Ma *et al.*, 2020).

Adicionalmente, el SO₄²⁻ se moviliza en el suelo a partir de esterres de sulfato orgánico y sulfonatos mediante la actividad de enzimas sulfhidrolasas (Santana *et al.*, 2021). En este proceso, bacterias y hongos constituyen una fuente importante de estas enzimas, lo que les permite utilizar compuestos organosulfurados como fuente de azufre (Santana *et al.*, 2021). En este sentido, las enzimas arilsulfatasa han sido ampliamente caracterizadas principalmente y análisis de genomas microbianos han revelado que están ampliamente distribuidas en hongos y bacterias, las cuales presentan mayor actividad cuando el azufre es deficiente en el suelo (Santana *et al.*, 2021). Esta enzima se encuentra comúnmente en la rizosfera, debido a que el sulfato es asimilado por las raíces (Santana *et al.*, 2021).

Azufre inorgánico

La descomposición de la materia orgánica desencadena la mineralización de S en la forma inorgánica asimilable para las plantas, el sulfato (Narayan *et al.*, 2023). Además, algunos minerales del suelo contienen azufre en distintas formas, los cuales pueden liberar sulfato mediante procesos de meteorización o descomposición (Narayan *et al.*, 2023) (Figura 2). Los minerales de azufre mas comunes se dividen con base al estado de oxidación del elemento, en este sentido se encuentran los minerales

de sulfato: anhidrita (CaSO₄), yeso (CaSO₄·H₂O), kieserita (MgSO₄·H₂O) y barita (BaSO₄) y también se encuentran minerales de sulfuro como bornita (Cu₅FeS₄), calcosita (Cu₂S), galena (PbS), pirita (FeS₂), esfalerita (ZnS) y molibdenita (MoS₂) (Chaudhary *et al.*, 2023; Narayan *et al.*, 2023).

Por otro lado, la combustión de combustibles fósiles y actividades industriales, constituyen una fuente antropogénica de azufre, el cual es liberado a la atmósfera en forma de dióxido de azufre (SO₂) (Figura 2) (Narayan *et al.*, 2023). Este gas se disuelve en el agua de lluvia y, mediante reacciones de oxidación se transforma en sulfato (SO₄²⁻), el cual se deposita en el suelo a través de la precipitación, aportando desde 5 hasta 250 kg de S ha⁻¹ año⁻¹ (Chaudhary *et al.*, 2023; Narayan *et al.*, 2023).

Adicionalmente, algunos insumos agrícolas como pesticidas y fertilizantes contienen azufre, por lo que el uso de estos productos incorpora S al suelo (Figura 2) (Narayan *et al.*, 2023). En ese sentido, el agua de riego que contiene residuos de estos insumos puede representar una vía adicional de entrada de azufre al sistema suelo (Chaudhary *et al.*, 2023).

Transformaciones microbianas de S

En el suelo, los microorganismos constituyen un componente esencial en la dinámica del azufre, ya que regulan su transformación entre diferentes formas químicas (Santana *et al.*, 2021). Sin embargo, identificar las comunidades microbianas que participan activamente en las transformaciones del azufre en el suelo, así como su actividad y abundancia, representa un desafío debido a la influencia de múltiples factores como el tipo de cultivo y las propiedades físicas y químicas del suelo (Santana *et al.*, 2021).

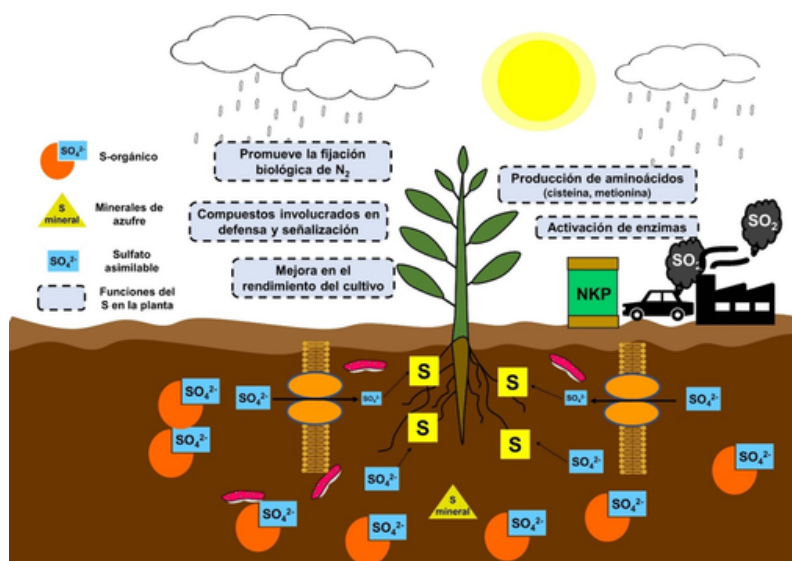


Figura 2. Principales reservorios, transformaciones y funciones del azufre en el sistema suelo-planta. Modificado de Narayan *et al.*, 2023.

Dentro de estas transformaciones microbianas, la oxidación de compuestos reducidos de azufre constituye un proceso clave en la dinámica del azufre en el suelo. Este proceso ocurre cuando los microorganismos oxidan especies de azufre como H_2S , S^0 y S^{2-} para producir SO_4^{2-} (Chaudhary *et al.*, 2023). Los géneros *Acidithiobacillus* y *Thiomonas* cuentan con una variedad de especies con la capacidad de oxidar diferentes especies de azufre (Wang *et al.*, 2019). Entre las bacterias heterotróficas oxidadoras de azufre destacan *Cytobacillus firmus*, *Enterobacter cloacae*, *Enterobacter ludwigii*, *Klebsiella oxytoca*, *Phytobacter diazotrophicus* y *Pseudomonas stutzeri* (Chaudhary *et al.*, 2023).

Las transformaciones microbianas de azufre son mediadas por reacciones de oxidación y reducción, las cuales generan energía a mediante la modificación de los estados de oxidación de este elemento (Li *et al.*, 2022). Los principales procesos microbianos del ciclo del S son: i) la reducción del sulfato, i) el sistema SOX, iii) oxidación del azufre y iv) la dismutación de azufre (Li *et al.*, 2022).

El sulfato (SO_4^{2-}) es una forma asimilable se S, el cual es captado e ingresado a las células por diversas proteínas transportadoras (Figura 3) (Rucket *et al.*, 2016; Narayan *et al.*, 2023).

El S asimilado es incorporado a la formación de biomasa a través de moléculas como el aminoácido cisteína (Figura 2). Por otro lado, participa activamente en el metabolismo secundario a través de la síntesis de compuestos como los glucosinolatos y las fitoalexinas, los cuales están involucrados en mecanismos de defensa como el estrés biótico y abiótico y vías de señalización (Santana *et al.*, 2021; Narayan *et al.*, 2023).

En el suelo, las transformaciones de azufre (S) se centra principalmente en procesos fundamentales en el ciclo biogeoquímico de este elemento: en primer lugar, mediante el metabolismo microbiano, donde el azufre

se cicla mediante procesos redox en sus formas reducidas (principalmente sulfuro, S^{2-}) y oxidadas (sulfato, SO_4^{2-}), los cuales están influenciados por las condiciones edáficas como la temperatura del suelo, disponibilidad de agua y la actividad enzimática de los microorganismos (Chaudhary *et al.*, 2023). Así también, ocurre un intercambio dinámico entre el azufre almacenado en la biomasa del suelo y SO_4^{2-} , la forma soluble mediante procesos de mineralización (Figura 2) (Malike *et al.*, 2021; Chaudhary *et al.*, 2023).

Diversas estrategias de suplementación de carbono en suelos, se aumenta la densidad microbiana, lo cual favorece la formación y mineralización de S-orgánico. Adicionalmente, se estimula el crecimiento microbiano y el de desarrollo vegetal, con ello, la demanda de azufre aumenta, por lo que se desencadena una competencia por el sulfato disponible, donde las plantas pueden estar limitadas de este elemento (Santana *et al.*, 2021).

Empleo de bacterias oxidadores de azufre en procesos de fertilización

Diversos estudios han reportado la presencia de bacterias oxidadoras de azufre en suelos agrícolas. Un estudio realizado por Chaudhary *et al.* (2022) aislaron y evaluaron bacterias con potencial para oxidar compuestos de azufre en suelos cultivados con mostaza. Los aislados estuvieron relacionados a las especies *Burkholderia cepacia*, *Enterobacter cloacae* y *Klebsiella oxytoca*, los cuales mostraron capacidad para producir sulfato bajo condiciones *in vitro* e *in vivo*. Adicionalmente, la inoculación con bacterias oxidadoras de azufre favorece la absorción de nitrógeno y azufre en cultivos como trigo y mostaza, lo que resalta su potencial como alternativa para mejorar la fertilidad del suelo en sistemas agrícolas más sostenibles (Chaudhary *et al.*, 2022).

Por otro lado, se ha implementado la inoculación de bacterias oxidantes de azufre en combinación con otros microorganismos benéficos para mejorar la nutrición vegetal. En este sentido, Anandham *et al.* (2007), inocularon

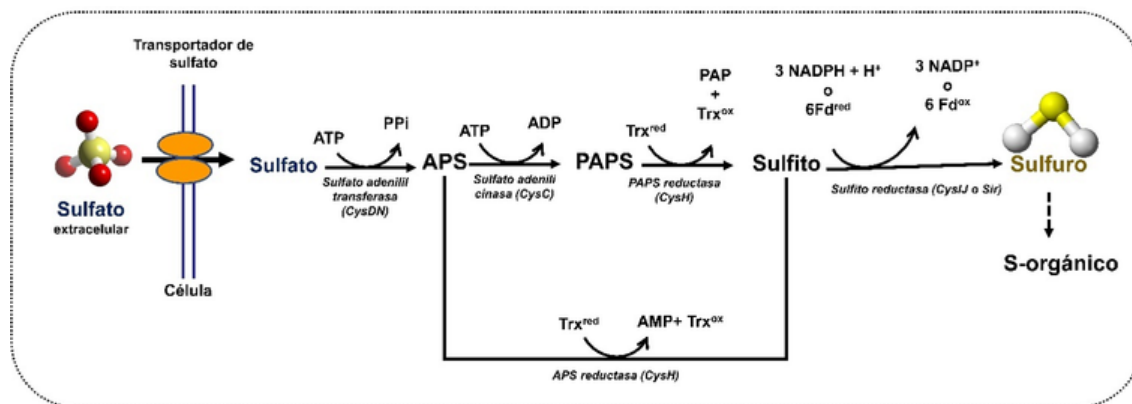


Figura 3. Asimilación de sulfato en las células. Modificado de Rückert, 2016.

cultivos maní (*Arachis hypogaea* L.) con bacterias del género *Thiobacillus* (oxidadoras de azufre) en conjunto con bacterias fijadoras de nitrógeno del género *Rhizobium*. La aplicación de estos dos grupos de microorganismos ha demostrado efectos positivos en cultivos de maní, promoviendo una mayor nodulación, incremento en la biomasa vegetal y mejoras en el rendimiento. La combinación de bacterias oxidantes de azufre con otros microorganismos promotores del crecimiento vegetal puede generar interacciones sinérgicas que favorecen la nutrición de las plantas y contribuyen a mejorar la eficiencia de los procesos de fertilización en suelos con baja disponibilidad de azufre (Anandham *et al.*, 2007).

Asimismo, se han implementado estrategias similares en cultivos de cebolla (*Allium cepa* L.) inoculados con bacterias oxidantes de azufre (*Thiobacillus thiooxidans*) y bacterias fijadoras de nitrógeno (*Azotobacter chroococcum* y *Azospirillum lipoferum*) (Awad *et al.*, 2011). Esta coinoculación favorece la disponibilidad de nutrientes y mejora el rendimiento del cultivo, así como un incremento significativo en el crecimiento de las plantas y la absorción de nitrógeno (Awad *et al.*, 2011). Estos resultados sugieren que la coinoculación de bacterias oxidantes de azufre con microorganismos fijadores de nitrógeno puede potenciar la eficiencia de la fertilización y contribuir a mejorar la productividad de los cultivos en suelos con limitaciones nutricionales (Awad *et al.*, 2011). En este contexto, la incorporación de bacterias oxidantes de azufre representa una potencial alternativa como una estrategia de fertilización orientada a la mejora de la nutrición vegetal y al manejo de la fertilidad del suelo.

Diversos estudios realizados en distintos sistemas agrícolas han mostrado que microorganismos oxidadores de azufre favorecen el desarrollo y rendimiento de cultivos de interés comercial, donde ésta actividad se ve potenciada cuando son co-inoculados con otros grupos microbianos como bacterias fijadoras de nitrógeno. Lo anterior, representa una alternativa de biofertilización, mejorando así el desarrollo de las plantas, así como el manejo de la fertilidad del suelo. En este sentido, profundizar en el estudio de la microbiota del suelo asociada al ciclo del azufre permitirá comprender con mayor detalle las interacciones que regulan la movilización de este elemento en el sistema suelo-planta y su relación con los procesos de nutrición vegetal.

Literatura citada

- Anandham, R., Sridar, R., Nalayini, P., Poonguzhali, S., Madhaiyan, M., & Sa, T. (2007). Potential for plant growth promotion in groundnut (*Arachis hypogaea* L.) cv. ALR-2 by co-inoculation of sulfur-oxidizing bacteria and Rhizobium. *Microbiological Research*, 162(2), 139–153. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2006.02.005>
- Ayala-Muñoz, D., Burgos, W. D., Sánchez-España, J., Falagán, C., Couradeau, E., & Macalady, J. L. (2022). Novel microorganisms contribute to biosulfidogenesis in the deep layer of an acidic pit lake. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 867321. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.867321>
- Awad, N. M., Abd El-Kader, A. A., Attia, M., & Alva, A. K. (2011). Effects of nitrogen fertilization and soil inoculation of sulfur-oxidizing or nitrogen-fixing bacteria on onion plant growth and yield. *International Journal of Agronomy*, 316856. <https://doi.org/10.1155/2011/316856>
- Canfield, D.E. & Farquhar, J. (2012). *The global sulfur cycle*. Fundamentals of Geobiology, First Edition.
- Chaudhary, S., Dhanker, R., Singh, K., Brar, B., & Goyal, S. (2022). Characterization of sulfur-oxidizing bacteria isolated from mustard (*Brassica juncea* L.) rhizosphere having the capability of improving sulfur and nitrogen uptake. *Journal of Applied Microbiology*, 133(5), 2814–2825. <https://doi.org/10.1111/jam.15742>
- Chaudhary, S., Sindhu, S. S., Dhanker, R., & Kumari, A. (2023). Microbes-mediated sulphur cycling in soil: Impact on soil fertility, crop production and environmental sustainability. *Microbiological Research*, 271, 127340. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127340>
- Fike, D., Bradley, A. S., Rose, C.V. (2015). Rethinking thencient sulfur cycle. *Annual Reviews Earth Planet Science*, 43, 593-622. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060313-054802>
- Jørgensen, B.B., Findlay A.J., Pellerin, A. (2019). The Biogeochemical Sulfur Cycle of Marine Sediments. *Frontiers in Microbiology*, 10(849), 1-27. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00849>
- Klotz, M.G., Bryant, D.A. & Hanson, T.E. (2011). The microbial sulfur cycle. *Frontiers in Microbiology*, 2(241) 1-2. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2011.00241>
- Lens, P. (2009). Sulfur cycle. En M. Schaechter (Ed.), *Encyclopedia of microbiology* (3rd ed., pp. 361–369). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012373944-5.00057-2>
- Li, W., Lv, G., & Hu, D. (2022). Soil microbial-mediated sulfur cycle and ecological network under typical desert halophyte shrubs. *Land Degradation & Development*, 33, 1–13. <https://doi.org/10.1002/ldr.4418>
- Ma, Q., Luo Y., Wen, Y., Hill, P., Chadwick, D., R., Wu, L., Jones, D. (2020). Carbon and sulphur tracing from soil organic sulphur in plants and soil microorganisms. *Soil Biology and Biochemistry*, 150,107971. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107971>
- Malik, K. M., Khan, K. S., Billah, M., Akhtar, M. S., Rukh, S., Alam, S., Munir, A., Aulakh, A. M., Rahim, M., Qaisrani, M. M., et al. (2021). Organic amendments and elemental sulfur stimulate microbial biomass and sulfur oxidation in alkaline subtropical soils. *Agronomy*, 11(12), 2514. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122514>
- Narayan, O. P., Kumar, P., Yadav, B., Dua, M., & Johri, A. K. (2023). Sulfur nutrition and its role in plant growth and development. *Plant signaling & behavior*, 18(1), 2030082. <https://doi.org/10.1080/15592324.2022.2030082>
- Rückert C. (2016). Sulfate reduction in microorganisms-recent advances and biotechnological applications. *Current opinion in microbiology*, 33, 140–146. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2016.07.007>
- Santana, M. M., Dias, T., Gonzalez, J. M., & Cruz, C. (2021). Transformation of organic and inorganic sulfur—Adding perspectives to new players in soil and rhizosphere. *Soil Biology and Biochemistry*, 160, 108306. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108306>
- Wang, R., Lin, J. Q., Liu, X. M., Pang, X., Zhang, C. J., Yang, C. L., Gao, X. Y., Lin, C. M., Li, Y. Q., Li, Y., Lin, J. Q., & Chen, L. X. (2019). Sulfur Oxidation in the Acidophilic Autotrophic *Acidithiobacillus* spp. *Frontiers in microbiology*, 9, 3290. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.03290>