

Ensayo expositivo

Viaje microscópico al interior de las plantas; conversando con las bacterias

Microscopic journey into plants; conversing with bacteria

Tania Mariela Vázquez-Ríos^{1*}, Alfonso Vázquez-López¹

¹Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, CIIDIR Unidad Oaxaca.

*Autor de correspondencia:
tvasquezr2200@alumno.ipn.mx

Recibido: 07-13-2024 Aceptado: 15-04-2026 (Artículo Arbitrado)

Resumen

Las plantas han evolucionado creando asociaciones con miembros de su ecosistema, lo que les permite adaptarse y desarrollarse en su entorno natural. Entre los principales organismos con los cuales desarrollan asociaciones beneficiosas encontramos a las bacterias. Las bacterias endófitas son microorganismos simbióticos que viven en los tejidos internos de las plantas. Estas bacterias proporcionan diversos efectos benéficos a la planta hospedante de forma directa o indirecta. De manera directa, ayudan a obtener nutrientes y a mejorar su crecimiento a través de la síntesis y regulación de hormonas vegetales; indirectamente ayudan a disminuir el desarrollo de patógenos mediante la producción de antibióticos o por competencia de nichos y nutrientes. Las bacterias endófitas de las plantas han atraído la atención de diversos investigadores debido a su diversidad y aplicaciones para mejorar la nutrición de las plantas o conferirles protección contra patógenos. La amplia diversidad de endófitos en las plantas, los convierte en una interesante herramienta en la biotecnología agrícola. Hasta ahora el estudio de bacterias endófitas se ha enfocado principalmente en plantas de importancia agrícola y en plantas silvestres; sin embargo, los estudios realizados en el sistema agave-endófitas en México son escasos. En este trabajo se explican las principales funciones de las bacterias endófitas y se documenta, por primera vez, su presencia en *Agave potatorum*.

Palabras clave: Planta, microorganismos endófitos, Agave spp.

Abstract

Throughout their evolution, plants have established associations with members of their ecosystem, which enables their adaptation and development in their natural environment. Among the main organisms with which they form beneficial associations are bacteria. Endophytic bacteria are symbiotic microorganisms that live in the internal tissues of plants. They provide the host plant with various beneficial effects, either directly or indirectly. Directly, endophytic bacteria promote nutrients uptake and enhance plant growth through the synthesis and regulation of plant hormones; indirectly, they contribute to reduce pathogen development by producing antibiotics or by competing for niches and nutrients. Plant endophytic bacteria have been extensively studied due to their diversity and applications in improving plant nutrition or conferring protection against pathogens. The vast diversity of endophytes in plants represents a promising resource in agricultural biotechnology. To date, the study of endophytic bacteria has primarily focused on agriculturally important and wild plants; however, studies on the agave-endophyte system in Mexico are scarce. This study explains the main functions of endophytic bacteria and documents, for the first time, their presence in *Agave potatorum*.

Keywords: Plant, endophytic microorganisms, Agave spp.

Introducción

Las plantas, aunque parecen organismos simples a primera vista esconden un universo fascinante en su interior. Sus órganos vegetales como las raíces, tallos, hojas, flores y semillas están formados por diminutas células que trabajan en conjunto para cumplir diversas funciones; dentro de este mundo celular microscópico y poco conocido por los humanos ha-

bitan organismos igualmente pequeños como bacterias, hongos y en algunos casos arqueas y protozoos (Sen et al., 2026). Estos microorganismos reciben el nombre de endófitos porque viven dentro de los tejidos y células de las plantas (Aleynova y Kiselev, 2023; Mushtaq et al., 2023).

La relación entre las plantas y los endófitos no es nueva, se ha formado a lo largo de miles de años de evolución, podríamos decir que es una alianza invisible y silenciosa; las plantas han desarrollado la capacidad para proteger a estos microorganismos ofreciéndoles refugio y alimento, mientras que los endófitos devuelven el favor ayudando a la planta a crecer y protegerse (Madbouly, 2023). Gracias a esta relación ambos organismos pueden sobrevivir a condiciones adversas como sequías, cambios bruscos de temperatura, ataques de otros organismos o la falta de nutrientes (Wu et al., 2021).

Se ha evidenciado que las bacterias endófitas no son simples habitantes de las plantas, sino que cumplen funciones específicas e importantes en el ciclo biológico de estas (Oukala et al., 2021; Kumari et al., 2023) por ejemplo, algunas bacterias estimulan la producción de hormonas naturales que favorecen el crecimiento vegetal tales como el ácido indol-3-acético, las citoquininas y los ácidos giberélicos (Medison et al., 2022); otras producen sustancias que actúan como antibióticos y las protegen contra enfermedades, mientras que la mayoría compiten con otros microorganismos dañinos por espacio y alimento (Xia et al., 2022). En pocas palabras, las bacterias endófitas son aliadas invisibles que fortalecen la salud y supervivencia de las plantas.

El estudio de bacterias endófitas se ha centrado en plantas de importancia agrícola tales como el maíz, arroz (silvestre y cultivado), trigo, tomate y en plantas silvestres. Sin embargo, son mínimos los estudios que se han realizado en el sistema agave-bacterias endófitas en México. De acuerdo con nuestra búsqueda bibliográfica; este documento constituye el primer reporte de bacterias endófitas encontradas en *Agave potatorum*.

Viaje al interior de la planta

Existen diversos tipos de viajes; los fantásticos que podemos realizar a través de la imaginación a mundos desconocidos, los reales que podemos realizar a sitios como la playa o la ciudad y otros de tercer tipo, los cuales son reales y fantásticos a la vez; nuestro viaje es de éstos. Viajaremos a un mundo microscópico habitado por seres diminutos de formas variadas. Este asombroso lugar es real, existe y está muy cerca de ti, aunque no lo creas. Es el maravilloso mundo microscópico de las plantas.

Nuestro viaje comienza en la localidad de Santa Catarina Minas, Ocotlán, ubicado a 34 km de la Cd. de Oaxaca. Santa Catarina se caracteriza por su producción de agaves mezcaleros; en este lugar encontramos plantas de *Agave angustifolia*, *Agave potatorum*, *Agave rhodacantha*, *Agave karwinskii*, entre otros. Los agaves, cuyo nombre proviene del griego *agavos* que significa “noble”, “admirable” y que se cree que Linneo se lo puso debido a la majestuosidad de sus rosetas y flores también son conocidos en México como magueyes (*metl* en lengua náhuatl), son la materia prima para elaborar el mezcal (de origen náhuatl basado en la palabra *mexcalli* que combina las palabras *metl* e *ixcalli*, que significa “agave cocido al horno”) (Gross, 2014; Vega y Pérez, 2017) una bebida alcohólica obtenida por destilación de alto valor histórico, cultural y económico (Rieger, 2025).

Los agaves son plantas extraordinarias que han evolucionado para adaptarse y sobrevivir a ambientes áridos y semiáridos donde la sequía y las altas temperaturas ponen a prueba la resistencia de cualquier organismo; gracias a sus adaptaciones fisiológicas y morfológicas como hojas gruesas que almacenan agua y mecanismos internos que regulan su metabolismo pueden soportar condiciones extremas, incluso temperaturas cercanas a los 61°C, son verdaderos campeones de la supervivencia en climas difíciles (Martínez-Rodríguez et al., 2019).

Pues bien, nuestro recorrido comienza en el interior de una hoja de *A. potatorum*; allí descubriremos un mundo invisible para el ojo humano, un mundo microscópico donde habitan aliados silenciosos; bacterias endófitas. Como en todos los viajes que se realizan a lugares desconocidos, es preciso la guía de un viajero experimentado; en esta ocasión nos haremos acompañar de una bacteria llamada *Sphingomonas*. Ella nos mostrará como estos diminutos habitantes conviven con la planta, la ayudan a crecer y la protegen contra los retos del medio ambiente ¡Así que acompáñenos en nuestro viaje!

- Hola *Sphingomonas* háblame un poco sobre ti, tengo curiosidad por saber quién eres.
- Hola querida amiga, me llamo *Sphingomonas*. Y sé que pensarás que mi nombre suena extraño, pero tiene una historia especial; resulta que, en mi membrana celular, una envoltura que me rodea y me da

forma, tengo unas moléculas llamadas esfingolípidos los cuales no son comunes y muy pocas de nosotros los poseemos (Geiger et al., 2018). Por eso me llamo así *Sphingo* por los esfingolípidos y *monas* del griego que significa “ser pequeño”, en pocas palabras soy la pequeña que guarda esfingolípidos (Yabuuchi et al., 1990).

- ¡Tienes un nombre único! Dime más sobre ti.
- Bueno no soy una sola, en realidad pertenezco a un gran género de bacterias que vivimos en muchos lugares: en el suelo, en el agua, en ambientes extremos y, sobre todo dentro de las plantas (Glaeser y Kämpfer, 2014). Algunas de mis parientes tienen capacidades sorprendentes como *Sphingomonas wittichii* famosa por degradar contaminantes peligrosos, o *Sphingomonas elodea* que produce gomas naturales usadas por los humanos en los alimentos (West, 2021). Y aunque algunas de mis primas pueden aparecer en hospitales y causar enfermedades en los humanos, la mayoría de nosotras somos aliadas invisibles de la naturaleza.

- ¡Woow tienen capacidades únicas! ¿Entonces tú vives en las plantas?

- Así es querida amiga. Soy una bacteria endófito, lo que significa que habito dentro de los tejidos de las plantas sin causarles daño (Mushtaq et al., 2023). Parte de mi vida la desarrollo fuera de la planta, cerca de las raíces y después ingreso poco a poco al interior de esta; para moverme utilizo mis flagelos unas pequeñas “colas” que funcionan como remos y me permiten desplazarme a diferentes órganos de la planta (Gayathri y Preethi, 2023).

- ¡Que fascinante, *Sphingomonas*! Me emociona acompañarte en este recorrido, pero... ¿cómo ingresaremos al interior de la planta?

- Bueno, nuestro viaje comienza en las raíces, las cuales son la principal puerta de entrada que utilizamos para ingresar al interior de la planta. Una de las vías más comunes son las lenticelas, que funcionan como pequeños “poros” o ventanas en la superficie de las raíces y tallos, gracias a ellas las plantas permiten la entrada de oxígeno y el intercambio de gases entre el exterior y el interior, también utilizamos los espacios donde aparecen las raíces laterales (Maela, 2019). Aunque las raíces son nuestra compuerta principal de acceso también existen otros caminos para ingresar; podemos aprovechar heridas provocadas

por otros organismos, las estomas de las plantas o incluso abrir nuestro propio camino utilizando herramientas especiales llamadas enzimas, que son capaces de disolver la pared de las células vegetales (Afzal et al., 2019; Rani et al., 2022).

- ¡Que interesante! Entonces las raíces son como puertas secretas... y dime querida amiga una vez que ingresan a la planta ¿hacia dónde se dirigen?

- Sígueme, te mostrare nuestro recorrido habitual. Una vez dentro, nos desplazamos desde las capas externas hacia las internas del tejido vegetal y finalmente llegamos al xilema (Figura 1), que es como un sistema de tuberías por donde circula el agua en la planta; gracias a su flujo y a nuestros flagelos podemos movernos y distribuirnos por toda la planta (Marag y Suman, 2018). De esta forma no nos limitamos solo a las raíces, sino que también llegamos a otros lugares como las hojas, las flores e incluso las semillas. Nuestro lugar favorito para vivir son los espacios intercelulares (apoplastos) que funcionan como pasillos entre las células, donde encontramos una gran cantidad de carbohidratos, aminoácidos y nutrientes que nos sirven de alimento (Sen et al., 2026).

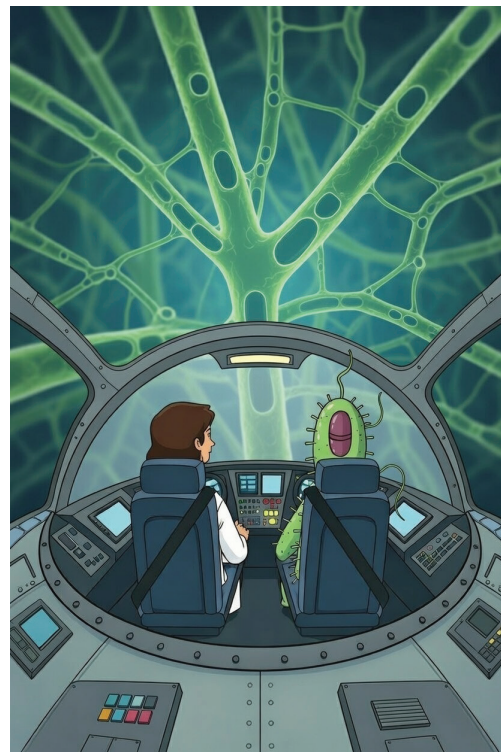


Figura 1. Representación conceptual de *Sphingomonas* y la científica viajando dentro del xilema de una planta.

Fuente: Imagen generada mediante inteligencia artificial para fines ilustrativos.

- Estoy muy emocionada, cuéntame más. ¿Cuáles son las principales tareas que realizan?

- Realizamos diversas tareas dentro de la planta, no estamos solas, convivimos con bacterias de otros géneros y formamos grupos llamados consorcios donde cada una aporta según sus habilidades. Algunas se encargan de ayudar a la planta a crecer, estimulando la producción de hormonas vegetales (ácido indol-3-acético, citoquininas, giberelinas), mensajeros internos que dicen “es hora de crecer” o “es momento de florecer” (Medison et al., 2022), otras actuamos como guardianes, liberando sustancias que actúan como antibióticos los cuales protegen a la planta de otros organismos dañinos (Figura 2) (Sheoran et al., 2015). Algunas de las bacterias más conocidas por estas habilidades pertenecen a los géneros *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Serratia*, *Enterobacter* y *Paenibacillus* (Afzal et al., 2019).

- ¡Es increíble lo que hacen! Y dime ¿además de ayudar al crecimiento y la defensa, ustedes también apoyan a las plantas cuando enfrentan situaciones difíciles?



Figura 2. Representación conceptual de una bacteria endófito protegiendo a la planta del ataque de microorganismos dañinos.

Fuente: Imagen generada mediante inteligencia artificial para fines ilustrativos.

- Claro que sí, algunas de mis compañeras tienen la capacidad de activar un mecanismo llamado resistencia sistémica inducida (ISR, por sus siglas en inglés) que funciona como una alarma interna que prepara a la planta para enfrentar problemas (Pieterse et al., 2012). Por ejemplo, cuando la planta sufre estrés por falta de agua, la ayudamos produciendo hormonas que regulan su crecimiento y generando antioxidantes que actúan como escudos contra el daño (Tshikhudo et al., 2023). Además, producimos unas sustancias llamadas exopolisacáridos los cuales forman una especie de gel alrededor de las raíces y el suelo, ese gel retiene agua y mantiene la humedad disponible por más tiempo lo que permite que la planta resista mejor la sequía y continúe creciendo incluso en ambientes secos (Verma et al., 2022).

- Ustedes son un sistema de apoyo invisible y permiten a las plantas resistir condiciones adversas.

- ¡Así es querida amiga! En conjunto, todos estos mecanismos refuerzan la salud de la planta y le permiten seguir desarrollándose incluso en ambientes difíciles.

- Desconocía el papel fundamental que tienen en el interior de la planta.

- Y aún falta mucho por conocer, existe poca información sobre nuestra forma de vida y sobre las actividades que realizamos dentro de éstas. Sin embargo, existen lugares como el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CII-DIR-IPN-OAXACA) donde se realizan investigaciones para conocer más sobre nosotras, especialmente en plantas de *Agave potatorum*. Estos agaves son especies silvestres que solo se encuentran en Oaxaca, crecen en distintos lugares, desde bosques de pino encino en las montañas hasta zonas semidesérticas donde las condiciones para crecer son difíciles. Además, sus características físicas como las hojas y la forma de su roseta pueden variar dependiendo del lugar y condiciones en las que crecen (polimorfismo).

Su tallo, conocido como “piña”, guarda grandes cantidades de azúcares, especialmente fructanos, gracias a ellos y a un tipo de metabolismo particular que le permite aprovechar mejor el agua y la luz (llamado metabolismo ácido crasuláceo o CAM) este agave puede resistir largos periodos de sequía (Langlé-Argüello et al., 2019). Por todas estas cualidades, el *A. potatorum* es un candidato ideal para estudiar

las bacterias que viven dentro de él y descubrir como contribuyen a su fortaleza.

- ¡Estamos aprendiendo mucho en este viaje! Nos gustaría conocer más sobre la investigación que están desarrollando en el CIIDIR-Oaxaca.

- Bueno déjame te cuento un poco, los investigadores están buscando bacterias endófitas de *A. potato*, pero en especial aquellas que pueden inhibir el crecimiento de hongos patógenos y las que poseen la capacidad de producir sustancias que ayudan a la planta a crecer más.

- ¡Woow *Sphingomonas*! Y dime, ¿encontraron algunas de esas bacterias presentes en esta planta?

- Si por supuesto. Entre las bacterias que aislaron y que mostraron estas capacidades estaban las del género *Burkholderia*. Se ha reportado previamente que este género de bacterias tiene una relación cercana con las plantas, ya que participan en diferentes actividades que van desde el crecimiento y desarrollo de éstas hasta protegerlas de ataques de organismos patógenos y condiciones difíciles (Pal et al., 2022). También encontraron bacterias del género *Sphingomonas*, como yo. Muchas de nosotras hemos sido reportadas mostrando actividades benéficas; una de las capacidades más destacadas es la de participar en la remediación de suelos contaminados con metales pesados (Gatheru et al., 2017). Sin embargo, en esta investigación se demostró un aspecto poco explorado: su potencial para combatir hongos fitopatógenos.

- Amiga *Sphingomonas* y ¿cómo hicieron los investigadores para demostrar que ustedes tenían esas capacidades?

- Bueno, para comprobarlo los investigadores nos pusieron a prueba frente a hongos que suelen causar enfermedades en las plantas. Utilizaron una técnica llamada cultivo dual, la cual consiste en colocarnos juntos en un mismo espacio y confrontarnos, es parecido a un combate de boxeo. Lo interesante es lo que ocurre después, si la bacteria logra detener al hongo alrededor de ella se forma un “halo de inhibición” el cual es como un círculo protector que impide que el hongo siga creciendo. Esta actividad es una señal que indica que la bacteria tiene la capacidad de combatir patógenos, lo que probablemente se deba a la liberación de sustancias capaces de frenar y dañar a este organismo.

Pero los investigadores no se detuvieron ahí, tam-

bién hicieron algunas pruebas para evidenciar si las bacterias producían compuestos especiales llamados metabolitos secundarios, que son sustancias que ayudan a las plantas a crecer y defenderse. Para ello usaron diferentes pruebas de laboratorio, una de las más llamativas fue la producción de sideróforos utilizando un medio de cultivo específico llamado CAS agar (Schwyn y Neilands, 1987). Este medio contiene una solución reveladora que funciona como un detector químico, cuando la bacteria produce sideróforos el color del medio cambia de azul a naranja. Así de esta manera visual y sencilla, los científicos pueden identificar cuales bacterias tienen esta capacidad.

- Eso suena muy interesante, pero me surge una duda ¿Qué son los sideróforos?

- Déjame te explico. El hierro, aunque es un elemento esencial para las plantas suele estar en el suelo en una forma difícil de aprovechar (Afzal et al., 2019). Nosotras, las bacterias endófitas, producimos sideróforos que actúan como pinzas químicas capaces de atrapar ese hierro y transformarlo a una forma más accesible y asimilable para la planta; de esta manera la planta incorpora el hierro a su nutrición y puede crecer con más fuerza y vitalidad (Adeleke et al., 2021).

- Gracias por explicarme, ahora comprendo mejor el papel que tienen las bacterias endófitas en las plantas y como pueden ayudar a mejorar su crecimiento y desarrollo.

- ¡Si, así es! Somos aliadas invisibles y aún queda mucho por explorar y descubrir sobre nosotras. Pero por el día de hoy nuestro viaje ha llegado a su fin, espero puedas visitarnos en otra ocasión y seguir aprendiendo más sobre nosotras.

- Agradezco que nos hayas dado un espacio de tu tiempo amiga *Sphingomonas*, espero que podamos regresar y sigamos aprendiendo más sobre el maravilloso mundo microscópico de las plantas. ¡Nos vemos en la próxima aventura amigos!

Conclusiones

Las bacterias endófitas son microorganismos que habitan los tejidos internos de las plantas y brindan diversos beneficios al crecimiento y desarrollo de estas, además ayudan a tolerar condiciones de estrés frente a factores bióticos y abióticos. En la naturaleza

existe una amplia gama de endófitos bacterianos de diversos hábitats que no han sido suficientemente estudiados, un ejemplo destacado son los agaves silvestres, cuya adaptación a condiciones extremas los convierte en potenciales reservorios de bacterias con funciones especializadas, lo que abre la posibilidad de descubrir organismos con capacidades únicas y sorprendentes.

La mayoría de bacterias endófitas estudiadas y reportadas han mostrado efectos benéficos para su uso en la promoción del crecimiento vegetal de la planta y como protectores biológicos contra patógenos. Estos microorganismos endófitos son una fuente prometedora para la creación de bioproductos y recursos con potencial biotecnológico. Por lo tanto, debe haber un mayor énfasis en el estudio de endófitos bacterianos con capacidades únicas y en la comprensión de la relación planta-microorganismo, para que puedan ser utilizados como una poderosa herramienta biotecnológica.

Referencias

- Adeleke, B.S., Babalola, O.O. (2021). The endosphere microbial communities, a great promise in agriculture. *Int Microbiol.*, 24(1):1-17. doi: 10.1007/s10123-020-00140-2.
- Afzal, I., Zabta Khan, S. Z., Sikandar, S., Shahzad, S. (2019). Plant beneficial endophytic bacteria: Mechanisms, diversity, host range and genetic determinants. *Microbiological Research*, 221:36-49. doi: 10.1016/j.micres.2019.02.001
- Aleynova, O. A., & Kiselev, K. V. (2023). Interaction of Plants and Endophytic Microorganisms: Molecular Aspects, Biological Functions, Community Composition, and Practical Applications. *Plants*, 12(4), 714. <https://doi.org/10.3390/plants12040714>
- Gatheru, W. M, Sun, K., Gao, Y. (2017). Sphingomonads in Microbe-Assisted Phytoremediation: Tackling Soil Pollution. *Trends Biotechnol.*, 35(9):883-899. doi: 10.1016/j.tibtech.2017.06.014.
- Gayathri, D. K., Preethi, K. (2023). Insights into bacterial endophytic diversity and isolation with a focus on their potential applications –A review. *Microbiological Research*, 266: 127256.
- Geiger, O., Padilla-Gómez, J., López-Lara, I.M. (2018). Bacterial Sphingolipids and Sulfonolipids. In: Geiger, O. (eds) Biogenesis of Fatty Acids, Lipids and Membranes. Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology. Springer, Cham., 123-137. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43676-0_12-1
- Glaeser, S.P and Kämpfer, P. (2014). The Family *Sphingomonadaceae*. In: Rosenberg, E., DeLong, E.F, Lory, S., Stackebrandt, E., Thompson, F. (eds) The Prokaryotes. Springer, Berlin, Heidelberg, 641–707. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30197-1_302
- Gross, T. (2014). Mezcal and Mexicanness: The Symbolic and Social Connotations of Drinking in Oaxaca. *Folklore*, 59, 7–28.
- Kumari, P., Deepa, N., Trivedi, P.K., Singh, B.K., Srivastava, V., Singh, A. (2023). Plants and endophytes interaction: A “secret wedlock” for sustainable biosynthesis of pharmaceutically important secondary metabolites. *Microb. Cell Fact.*, 2(1):226.
- Langlé-Argüello, L.A., Martínez-Gutiérrez, G.A., Santiago-García, P.A., Escamirosa-Tinoco, C., Morales, I., & Enríquez-del-Valle, J.R. (2019). Soluciones Nutricionales y Sequía en el Crecimiento Vegetal y Contenido de Fructanos de *Agave Potatorum* Zucc. *HortScience*, 54 (9), 1581-1584. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14129-19>
- Madbouly, A.K. (2023). Endophytic Fungi as Sources of Novel Natural Compounds. In: Rashad, Y.M., Baka, Z.A.M., Moussa, T.A.A. (eds) Plant Mycobiome. Springer, Cham., 339-373. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28307-9_14
- Maela, P. M. (2019). Current understanding of bacterial endophytes, their diversity, colonization and their roles in promoting plant growth. *Appl. Microbiol.* 5, 1–12.
- Marag, P.S., Suman, A. (2018). Growth stage and tissue specific colonization of endophytic bacteria having plant growth promoting traits in hybrid and composite maize (*Zea mays* L.). *Microbiol Res.*, 214:101-113. doi: 10.1016/j.micres.2018.05.016.
- Martínez-Rodríguez, J. D. C., de La Mora-Amutio, M., Plascencia-Correa, L. A., Audelo-Regalado, E., Guardado, F. R., Hernández-Sánchez, E., Peña-Ramírez, Y. J., Escalante, A., Beltrán-García, M. J., & Ogura, T. (2019). Cultivable endophytic bacteria from leaf bases of *Agave tequilana* and their role as plant growth promoters. *Brazilian Journal of Microbiology*, 45(4):1333-9. doi: 10.1590/s1517-83822014000400025.
- Medison, R.G., Tan, L., Medison, M.B., Chiwina, K.E. (2022). Use of beneficial bacterial endophytes: A practical strategy to achieve sustainable agriculture. *AIMS Microbiol.*, 8(4):624-643. doi: 10.3934/microbiol.2022040.
- Mushtaq, S., Shafiq, M., Tariq, M.R., Sami A., Nawaz-ul-Rehman, M.S., Bhatti, M.H.T., Haider, M.S., Sadiq, S., Abbas, M.T., Hussain, M. and Shahid, M.A. (2023) Interaction between bacterial endophytes and host plants. *Front. Plant Sci.*, 13, 1092105.
- Oukala, N., Aissat, K., Pastor, V. (2021). Bacterial Endophytes: The Hidden Actor in Plant Immune Responses against Biotic Stress. *Plants (Basel)*, 10(5):1012. doi: 10.3390/plants10051012.
- Pal, G., Saxena, S., Kumar, K., Verma, A., Sahu, P.K., Pandey, A., White, J. F., Verma, S. K. (2022). Endophytic *Burkholderia*: Multifunctional roles in plant growth promotion and stress tolerance. *Microbiol Res.*, 265:127201. doi: 10.1016/j.micres.2022.127201.
- Pieterse, C. M., Van der Does, D., Zamioudis, C., Leon-Reyes, A., Van Wees, S. C. (2012). Hormonal modulation of plant immunity. *Annu Rev Cell Dev Biol.*, 28:489-521. doi: 10.1146/annurev-cellbio-092910-154055.
- Rani, S., Kumar, P., Dahiya, P., Maheshwari, R., Dang, A.S. and Suneja, P. (2022). Endophytism: A Multidimensional Approach to Plant–Prokaryotic Microbe Interaction. *Front. Microbiol.* 13:861235. doi: 10.3389/fmicb.2022.861235
- Rieger, I. A. (2025). “Rewilding” del mercado de Mezcal: Prácticas culturales y conservación de los agaves en Oaxaca, México. *Wild*, 2(2), 20. <https://doi.org/10.3390/wild2020020>
- Sen, A., Saji, J., Faseela, P., Zhang, C., Mohanan, S., & Xia, Y. (2026). Exploring the Functional Roles of Endophytic Bacteria in Plant Stress Tolerance for Sustainable Agriculture: Diversity, Mechanisms, Applications, and Challenges. *Plants*, 15(2), 206.
- Schwyn, B. & Neilands, J.B. (1987). Universal CAS assay for the detection and determination of siderophores. *Analytical biochemistry*, 160, 47-56.

- Sheoran, N., Nadakkakath, A. V., Munjal, V., Kundu, A., Subaharan, K., Venugopal, V., Rajamma, S., Eapen S. J., Kumar, A. (2015). Genetic analysis of plant endophytic *Pseudomonas putida* BP25 and chemo-profiling of its antimicrobial volatile organic compounds. *Microbiological Research*, 173, 66-78.
- Tshikhudo, P. P., Ntushelo, K., & Mudau, F. N. (2023). Sustainable Applications of Endophytic Bacteria and Their Physiological/Biochemical Roles on Medicinal and Herbal Plants: Review. *Microorganisms*, 11(2), 453. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020453>
- Vega Vera, N. V., y Pérez Akaki, P. (2017). Oaxaca y sus regiones productoras de mezcal: Un análisis desde cadenas globales de valor. *Perspectivas Rurales Nueva Época*, 15(29), 103-132.
- Verma, A., Shameem, N., Jatav, H.S., Sathyanarayana, E., Parray, J.A., Pocai, P., Sayyed, R.Z. (2022). Fungal Endophytes to Combat Biotic and Abiotic Stresses for Climate-Smart and Sustainable Agriculture. *Front Plant Sci.*, 13:953836. doi: 10.3389/fpls.2022.953836.
- West, T. P. (2021). Synthesis of the Microbial Polysaccharide Gellan from Dairy and Plant-Based Processing Coproducts. *Polysaccharides*, 2(2), 234-244.
- Wu, W., Chen, W., Liu, S., Wu, J., Zhu, Y., Qin, L. and Zhu, B. (2021). Beneficial Relationships Between Endophytic Bacteria and Medicinal Plants. *Front. Plant Sci.* 12:646146. doi: 10.3389/fpls.2021.646146
- Xia, Y., Liu, J., Chen, C., Mo, X., Tan, Q., He, Y., Wang, Z., Yin, J., Zhou, G. (2022). The Multifunctions and Future Prospects of Endophytes and Their Metabolites in Plant Disease Management. *Microorganisms*, 10, 1072.
- Yabuuchi, E., Yano, I., Oyaizu, H., Hashimoto, Y., Ezaki, T., & Yamamoto, H. (1990). Proposals of *Sphingomonas paucimobilis* gen. nov. and comb. nov., *Sphingomonas parapaucimobilis* sp. nov., *Sphingomonas yanoikuyae* sp. nov., *Sphingomonas adhaesiva* sp. nov., *Sphingomonas capsulata* comb. nov., and two genospecies of the genus *Sphingomonas*. *Microbiology and immunology*, 34(2), 99-119.