



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.  
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2025,  
Volumen 9, Número 4.

[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v9i2](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2)

**EL PAPEL DE LOS MICROORGANISMOS  
ENDÓFITOS EN EL CRECIMIENTO VEGETAL  
Y LA TOLERANCIA A DIFERENTES TIPOS  
DE ESTRÉS**

**THE ROLE OF ENDOPHYTIC MICROORGANISMS  
IN PLANT GROWTH AND TOLERANCE TO  
DIFFERENT TYPES OF STRESS**

**Brenda Paola Jacob Romero**

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

**Maria Mayra de la Torre Martínez**

Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C., México

**Víctor Manuel González Mendoza**

Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C., México

DOI: [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v9i4.19576](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i4.19576)

## El Papel de los Microorganismos Endófitos en el Crecimiento Vegetal y la Tolerancia a Diferentes Tipos de Estrés

**Brenda Paola Jacob Romero<sup>1</sup>**

[ja369362@uaeh.edu.mx](mailto:ja369362@uaeh.edu.mx)

<https://orcid.org/0009-0008-8500-6001>

Lic. Ingeniería en Biociencias

Escuela Superior de Apan

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

México

**Maria Mayra de la Torre Martínez**

[mdelatorre@ciad.mx](mailto:mdelatorre@ciad.mx)

<https://orcid.org/0000-0001-7753-6602>

Centro de Investigación en Alimentación y

Desarrollo A.C., Subsede Hidalgo

México

**Víctor Manuel González Mendoza**

[victor.gonzalez@ciad.mx](mailto:victor.gonzalez@ciad.mx)

<https://orcid.org/0000-0003-0082-9954>

SECIHTI

Centro de Investigación en Alimentación y

Desarrollo A.C., Subsede Hidalgo

México

### RESUMEN

El presente trabajo examina el papel de los microorganismos endófitos —entre ellos bacterias, hongos, levaduras, arqueas y cianobacterias— como componentes esenciales del microbioma vegetal y su importancia en la biotecnología aplicada a la agricultura. Estos organismos colonizan los tejidos internos de las plantas sin provocar síntomas de enfermedad y establecen interacciones que promueven el crecimiento, favorecen la absorción de nutrientes, participan en la fijación de nitrógeno, aumentan la tolerancia frente a condiciones ambientales adversas y, además, producen metabolitos secundarios con efectos benéficos para el hospedero. Asimismo, se abordan sus principales formas de clasificación, los mecanismos generales de colonización y las vías más comunes de transmisión, junto con las funciones que cumplen en la nutrición y la protección de los cultivos. Entre los aspectos más relevantes destaca su capacidad para estimular el desarrollo vegetal mediante la producción de compuestos reguladores, mejorar la disponibilidad de nutrientes y contribuir a la defensa contra patógenos y diferentes tipos de estrés ambiental. Las conclusiones resaltan que los endófitos constituyen un recurso estratégico para el diseño de prácticas agrícolas sostenibles, al ofrecer alternativas viables al uso intensivo de agroquímicos y aportar soluciones frente a los retos derivados del cambio climático.

**Palabras clave:** microorganismos endófitos, crecimiento vegetal, estrés ambiental, potencial biotecnológico

---

<sup>1</sup> Autor principal

Correspondencia: [victor.gonzalez@ciad.mx](mailto:victor.gonzalez@ciad.mx)

# The Role of Endophytic Microorganisms in Plant Growth and Tolerance to Different Types of Stress

## ABSTRACT

The present work examines the role of endophytic microorganisms—among them bacteria, fungi, yeasts, archaea, and cyanobacteria—as essential components of the plant microbiome and their importance in biotechnology applied to agriculture. These organisms colonize internal plant tissues without causing disease symptoms and establish interactions that promote growth, enhance nutrient uptake, participate in nitrogen fixation, increase tolerance to adverse environmental conditions, and additionally produce secondary metabolites with beneficial effects for the host. Furthermore, their main forms of classification, general colonization mechanisms, and the most common transmission pathways are addressed, along with the functions they perform in crop nutrition and protection. Among the most relevant aspects is their ability to stimulate plant development through the production of regulatory compounds, improve nutrient availability, and contribute to defense against pathogens and various types of environmental stress. The conclusions highlight that endophytes constitute a strategic resource for the design of sustainable agricultural practices, offering viable alternatives to the intensive use of agrochemicals and providing solutions to the challenges posed by climate change.

**Keywords:** endophytic microorganisms, plant growth, environmental stress, biotechnological potencial

*Artículo recibido 04 Agosto 2025*  
*Aceptado para publicación: 29 Agosto 2025*



## INTRODUCCIÓN

En los ecosistemas terrestres, las plantas interactúan con una gran diversidad de microorganismos que habitan en distintos nichos ecológicos. Uno de ellos es el suelo, que constituye el entorno mineral y orgánico donde reside gran parte de esta diversidad microbiana. En continuidad con este ambiente se encuentra la rizosfera, es decir, la zona inmediatamente adyacente a las raíces, enriquecida por compuestos exudados por la planta. Ascendiendo hacia las partes aéreas, la fobosfera comprende las superficies externas como hojas, tallos y flores, donde se establecen comunidades epífitas. Por último, en un entorno más interno y protegido, se localiza la endósfera, que representa el interior de los tejidos vegetales, donde ciertos microorganismos logran establecerse sin causar daño. Estos entornos conforman un continuo ecológico que integra al microbioma vegetal, siendo la endósfera el nicho donde habitan los microorganismos endófitos, actores clave en la fisiología vegetal y en la adaptación a condiciones ambientales adversas.

### **¿Qué son los microorganismos endófitos?**

Los microorganismos endófitos son aquellos que habitan de forma interna en los tejidos de las plantas sin causar síntomas visibles de enfermedad en sus hospederas. Este grupo incluye bacterias, hongos, levaduras, y en algunos casos, incluso cianobacterias y arqueas, todos capaces de establecer relaciones simbióticas o comensales con la planta. Gracias a su diversidad metabólica y ecológica, estos microorganismos pueden desempeñar un papel fundamental en el desarrollo vegetal, actuando como promotores del crecimiento, agentes de protección contra patógenos, y moduladores de respuestas de defensa frente a condiciones ambientales adversas.

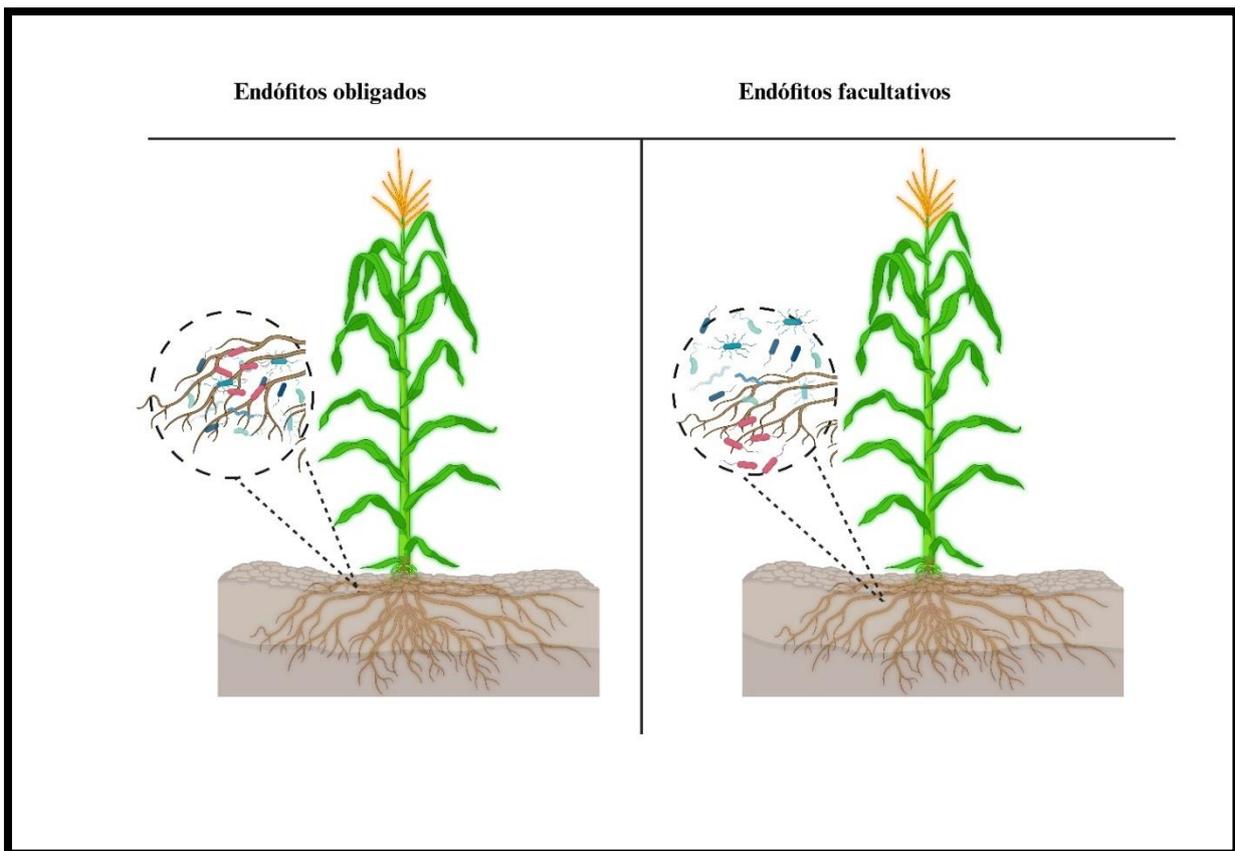
### **Clasificación ecológica y dependencia funcional**

Según su grado de dependencia con la planta, los endófitos se clasifican en obligados y facultativos. Los endófitos obligados requieren vivir dentro de la planta para completar su ciclo de vida, ya que han coevolucionado con ella. Este es el caso de algunos hongos micorrízicos arbusculares, que dependen totalmente del hospedero y no pueden cultivarse en ausencia de la planta. En contraste, los endófitos facultativos pueden alternar entre una vida libre en el ambiente y una vida endofítica dentro del hospedero.



Como se muestra en la Figura 1, los primeros se localizan exclusivamente en tejidos internos, mientras que los facultativos pueden colonizar desde el suelo y adaptarse a condiciones variables. Ejemplos comunes de endófitos facultativos incluyen hongos filamentosos como *Trichoderma spp.* y *Fusarium spp.*, así como bacterias como *Bacillus spp.* y *Pseudomonas spp.*, los cuales pueden establecer interacciones benéficas dependiendo del entorno.

**Figura 1** Clasificación de endófitos en plantas. Los endófitos obligados requieren del hospedero para sobrevivir y completar su ciclo de vida, mientras que los facultativos pueden vivir tanto dentro de la planta como en el ambiente circundante



### Estructuras colonizadas y rutas de ingreso

Estos microorganismos pueden colonizar múltiples estructuras de la planta, como raíces, tallos, hojas, semillas, flores e incluso frutos. Su ubicación puede variar desde los espacios intercelulares hasta el interior de las células vegetales o del sistema vascular (xilema o floema), donde establecen relaciones complejas con la planta hospedera que contribuyen a su adaptación y supervivencia.

### Relevancia biotecnológica y fisiológica

La importancia de los microorganismos endófitos radica tanto en su influencia directa sobre la fisiología de las plantas como en su potencial biotecnológico aplicado en diversos sistemas agrícolas.

En términos fisiológicos, estos organismos interactúan con el hospedero vegetal modulando rutas metabólicas esenciales, como la síntesis y señalización hormonal, particularmente a través de la producción de auxinas, giberelinas, citocininas y otras fitohormonas. Esta capacidad les permite influir en el crecimiento radicular, la elongación de tallos, la floración y la respuesta al estrés ambiental (Santoyo *et al.*, 2016).

Además, los endófitos pueden contribuir a mejorar la eficiencia en la adquisición de nutrientes, facilitando la solubilización de fosfatos, la movilización de micronutrientes como hierro y zinc, y en algunos casos, la fijación biológica del nitrógeno atmosférico (Rosenblueth & Martínez-Romero, 2006). También pueden inducir mecanismos de defensa sistémica, activando genes que fortalecen las barreras inmunológicas del hospedero frente a patógenos y condiciones adversas (Oukala *et al.*, 2021).

Desde el enfoque biotecnológico, estos microorganismos han sido ampliamente investigados por su potencial como biofertilizantes y biopesticidas, representando alternativas sostenibles al uso intensivo de agroquímicos (Santoyo *et al.*, 2016). La formulación de consorcios microbianos con capacidad de adaptación a distintos tipos de suelos y cultivos puede permitir su aplicación en la regeneración de agroecosistemas degradados y el incremento de la resiliencia de las plantas frente al cambio climático. Asimismo, su capacidad para sintetizar metabolitos secundarios con propiedades antioxidantes, antimicrobianas o promotoras del crecimiento vegetal los convierte en recursos potencialmente valiosos para la industria agrícola, farmacéutica y biotecnológica.

Por lo tanto, comprender las funciones fisiológicas y aplicaciones tecnológicas de los microorganismos endófitos no solo profundiza en el conocimiento de las interacciones planta-microorganismo, sino que también impulsa el desarrollo de herramientas innovadoras para una agricultura más productiva y ecológicamente equilibrada.

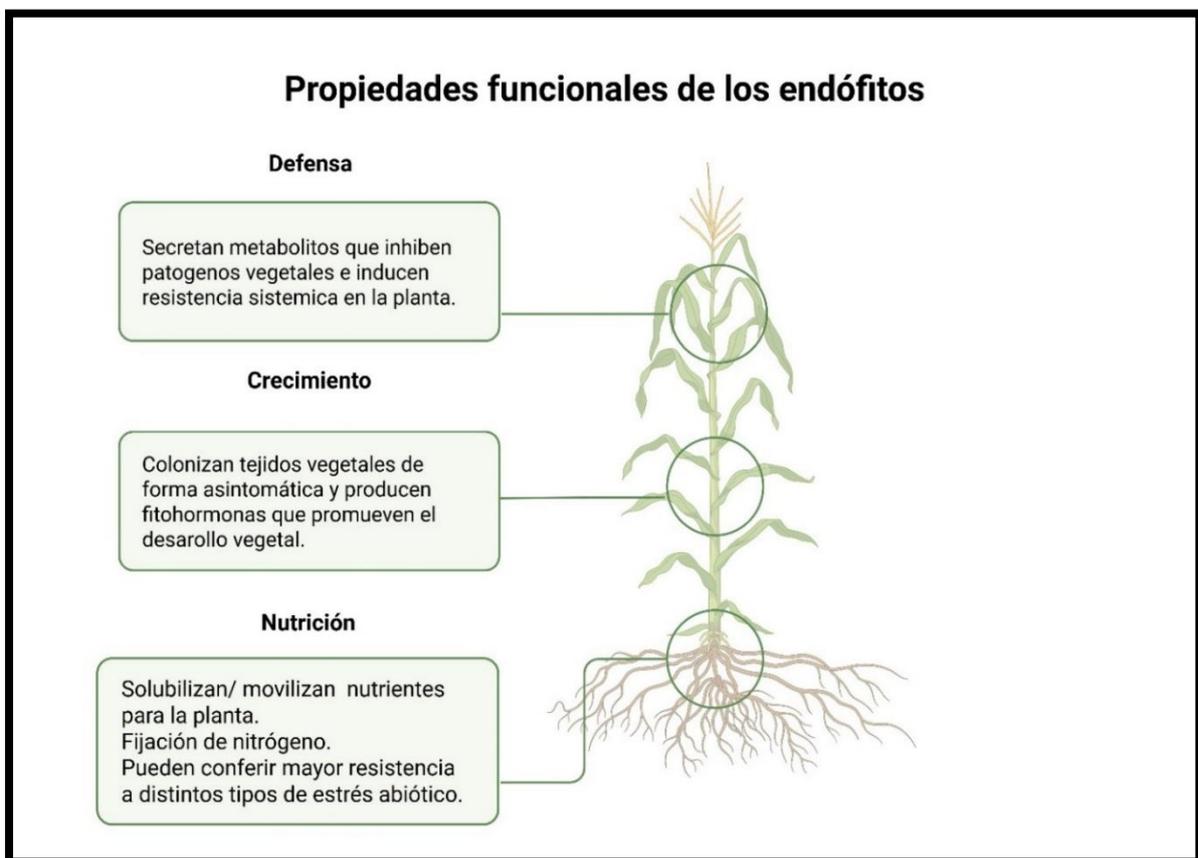
### **Características generales de los endófitos.**

Los microorganismos endófitos se caracterizan principalmente por su capacidad para habitar el interior de las plantas sin causar daño aparente. Colonizan diversos tejidos vegetales como raíces, tallos, hojas, semillas e incluso flores sin generar síntomas visibles de enfermedad, lo que los diferencia claramente de los patógenos. Su relación con el hospedero puede ser de tipo benéfica o neutra, y en muchos casos establecen interacciones simbióticas que favorecen el desarrollo vegetal.



Una de las funciones más destacadas de los endófitos es la promoción del crecimiento y la salud de las plantas. Muchos de estos microorganismos pueden producir fitohormonas como auxinas, citoquininas y giberelinas, que estimulan el desarrollo radicular, la elongación de tallos, la formación de brotes y la floración. Asimismo, pueden mejorar la absorción de nutrientes esenciales como fósforo, nitrógeno, hierro y zinc, lo que resulta en un incremento de la biomasa vegetal y una mayor eficiencia metabólica desde etapas tempranas del crecimiento (Santoyo *et al.*, 2016; Compant *et al.*, 2010). Estas propiedades funcionales de los endófitos, relacionadas con defensa, crecimiento y nutrición, se resumen en la Figura 2

**Figura 2** Propiedades funcionales de los endófitos: defensa, promoción del crecimiento y mejora de la nutrición en plantas



Además de ayudar a promover el desarrollo, los endófitos pueden actuar como agentes protectores frente a diversas amenazas biológicas y condiciones ambientales adversas. Son capaces de secretar compuestos antimicrobianos con actividad antifúngica y antibacteriana, que inhiben el desarrollo de fitopatógenos (Rosenblueth & Martínez-Romero, 2006; Oukala *et al.*, 2021).

En paralelo, muchos inducen en la planta respuestas de defensa conocidas como resistencia sistémica inducida (ISR), activando genes relacionados con la inmunidad vegetal (Oukala *et al.*, 2021; Fontana *et al.*, 2021). Esta capacidad protectora se extiende también al ámbito del estrés abiótico, ya que numerosos endófitos contribuyen a aumentar la tolerancia de las plantas frente a sequía, salinidad, temperaturas extremas y toxicidad por metales pesados, a través de mecanismos fisiológicos y bioquímicos especializados.

Las interacciones entre endófitos y plantas pueden variar dependiendo del grupo microbiano en cuestión. Las bacterias endófitas destacan por su capacidad para fijar nitrógeno atmosférico, producir sideróforos y solubilizar fosfatos, siendo ejemplos comunes los géneros *Bacillus spp.* y *Rhizobium spp.* Los hongos endófitos como *Trichoderma spp.* y cepas no patógenas de *Fusarium spp.* se caracterizan por generar metabolitos antifúngicos, mejorar la absorción de nutrientes y aumentar la tolerancia al estrés (Fontana *et al.*, 2021). Las levaduras endófitas producen ácido indolacético (IAA), sideróforos y enzimas beneficiosas, lo que les permite adaptarse eficientemente a ambientes cambiantes (Ling *et al.*, 2020). Las arqueas, aunque menos estudiadas, han mostrado potencial en la participación de ciclos de nutrientes y la mitigación del estrés oxidativo, destacando por su presencia en condiciones extremas (Chow *et al.*, 2022).

Por su parte, las cianobacterias endófitas, como *Nostoc spp.*, establecen simbiosis con helechos y plantas primitivas, fijando nitrógeno y aportando compuestos bioactivos que contribuyen al metabolismo de sus hospederos (Bergman *et al.*, 1992; Pereira *et al.*, 2019).

Los endófitos contribuyen activamente a la fisiología vegetal. Modulan rutas hormonales, solubilizan nutrientes, sintetizan metabolitos secundarios, y en condiciones de estrés, mejoran la tolerancia a sequía, salinidad, temperaturas extremas y toxicidad por metales pesados.

## **Clasificación y mecanismos de transmisión**

### **1. Endófitos obligados y facultativos**

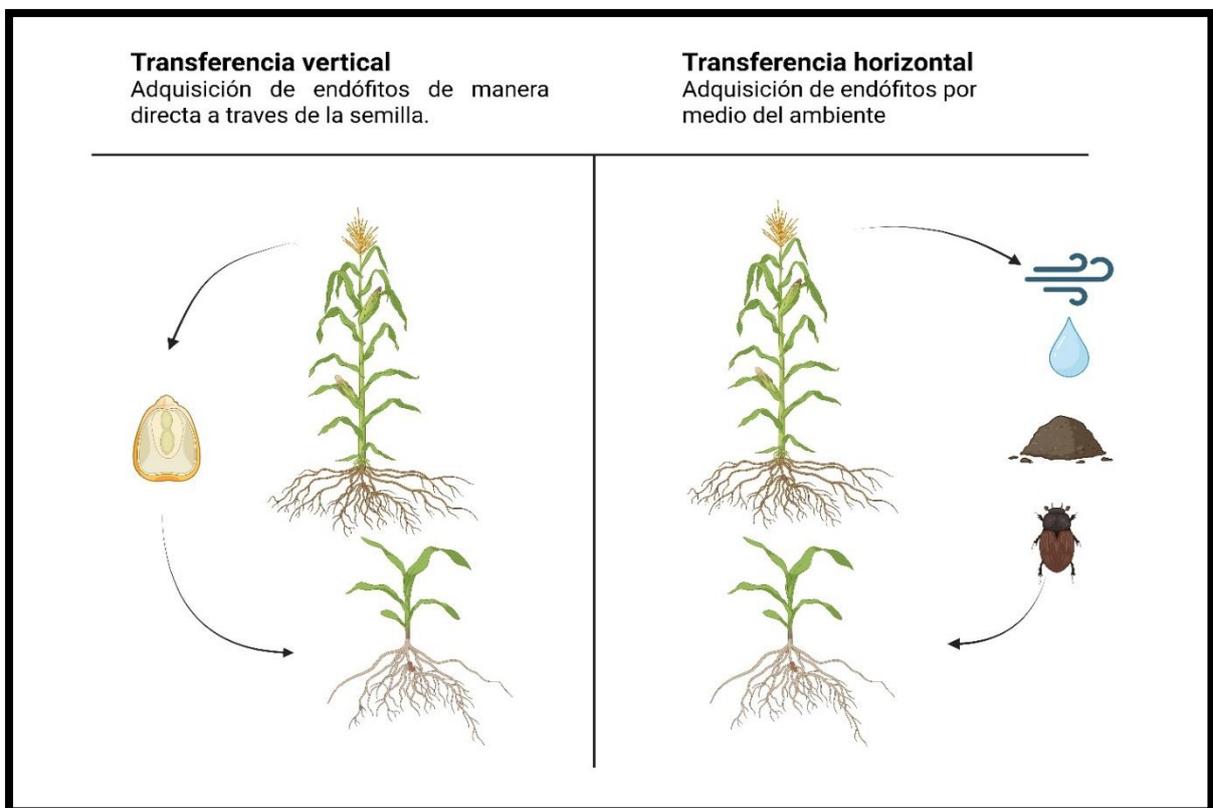
Clasificándolos por su grado de dependencia, se dividen en obligados y facultativos; los endófitos obligados dependen completamente de la planta hospedera para completar su ciclo de vida, mientras que los endófitos facultativos, por el contrario, pueden sobrevivir libremente en el ambiente y colonizar las plantas cuando las condiciones lo permiten.



## 2. Transmisión vertical y horizontal

Los microorganismos endófitos pueden transmitirse a través de dos vías principales: vertical y horizontal. Como se muestra en la figura 3, la transmisión vertical ocurre cuando los endófitos se heredan directamente de la planta madre a la descendencia mediante las semillas, lo cual asegura la continuidad del microbioma a lo largo de generaciones (Wang & Zhang, 2023). En contraste, la transmisión horizontal se da cuando las plantas adquieren nuevos endófitos desde el ambiente, a través del contacto con el suelo, el aire, el agua u otros organismos presentes en su entorno.

**Figura 1** Mecanismos de transmisión de endófitos: transferencia vertical a través de la semilla y transferencia horizontal desde el ambiente.



### Ingreso a través del xilema o tejidos no vasculares

Los endófitos pueden penetrar la planta a través de las raíces o por heridas naturales en los tejidos y, una vez dentro, colonizar espacios intercelulares, el sistema vascular (especialmente el xilema), o incluso el interior de células vegetales. Durante su tránsito por el xilema, algunos endófitos son capaces de migrar hacia los órganos aéreos de la planta, incluyendo hojas, tallos, flores y, de forma crucial, los órganos reproductivos.

Este proceso posibilita que los endófitos lleguen hasta los óvulos en desarrollo o los tejidos circundantes de las semillas, incorporándose de manera pasiva al embrión vegetal. De esta forma, se facilita su herencia vertical, asegurando la transmisión de endófitos benéficos a la siguiente generación desde las primeras etapas del desarrollo. Por ejemplo, algunas cepas de *Bacillus spp.* y *Pseudomonas spp.* se han detectado en el xilema de maíz y trigo, habiendo migrado desde raíces a semillas, influenciando positivamente la germinación y el crecimiento temprano (Wang & Zhang, 2023).

### **Colonización del estigma y ovario durante la floración**

Otra vía importante es la entrada de endófitos a través del aparato reproductor femenino durante la floración. En este caso, microorganismos del ambiente presentes en el aire, insectos polinizadores o en la superficie de las flores pueden colonizar el estigma de la flor y desde allí migrar hacia el ovario. Al establecerse en los tejidos ováricos, estos endófitos logran acceder a la semilla en formación, lo que permite que la descendencia inicie su desarrollo con una microbiota heredada tempranamente, incluso antes de que ocurra la germinación. Este proceso puede estar influenciado por la especie vegetal, el tipo de flor y las condiciones ambientales durante la polinización. Se ha observado esta ruta de colonización en flores de *Arabidopsis thaliana* y algunas gramíneas, donde microorganismos presentes en el polen o en el ambiente logran establecerse en las semillas por esta vía (Wang & Zhang, 2023).

### **Contacto postcosecha con el ambiente**

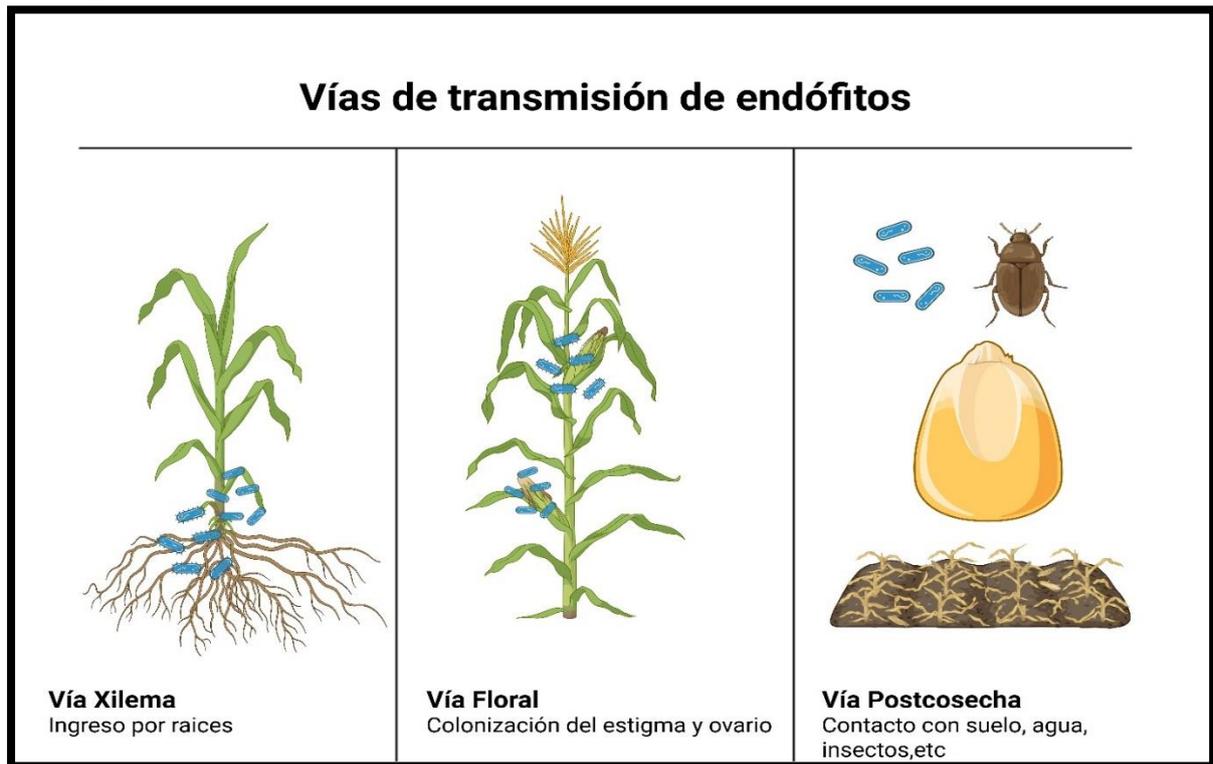
Una vez que las semillas maduran y son liberadas, su interacción con el ambiente representa una oportunidad clave para la adquisición horizontal de nuevos endófitos. Este proceso puede ocurrir cuando las semillas entran en contacto con:

- el suelo (rizobacterias endófitas),
- el agua (cianobacterias u hongos dispersos por corrientes),
- materia orgánica en descomposición, o
- microorganismos transportados por insectos y animales.

Los microorganismos presentes en estos entornos pueden ingresar a la semilla a través de micropilas, grietas superficiales o zonas de alta humedad, estableciendo una colonización inicial que puede mantenerse durante la germinación y el desarrollo temprano de la plántula.

Se han documentado casos de colonización exitosa de semillas de arroz por bacterias endófitas del género *Azospirillum spp.* y hongos del género *Trichoderma spp.*, adquiridos desde su entorno natural antes o durante la germinación (Wang & Zhang, 2023). Las vías de ingreso xilemático, floral y postcosecha de los endófitos se resumen esquemáticamente en la Figura 4

**Figura 2** Vías de transmisión de endófitos en plantas: (i) vía xilema, mediante ingreso a través de raíces; (ii) vía floral, por colonización de estigmas y ovarios; y (iii) vía postcosecha, a partir del contacto con suelo, agua o vectores como insectos.



### 3. Dinámica de colonización y establecimiento

La colonización comienza con la detección de exudados radiculares por parte de los microorganismos. Luego, se adhieren a la superficie de la planta, penetran mediante estomas o heridas, y finalmente se establecen en tejidos internos. Para persistir, deben evitar o modular las respuestas inmunes vegetales (Kandel, *et al.*, 2017).

### 4. Funciones fisiológicas y ecológicas

#### Funciones específicas según el tipo de microorganismo endófito

Los microorganismos endófitos, al establecer relaciones simbióticas con las plantas, pueden colonizar tejidos internos sin causar síntomas visibles de enfermedad. Estas interacciones aportan múltiples beneficios al hospedero vegetal, dependiendo del tipo de microorganismo involucrado:

- Bacterias endófitas: promueven el crecimiento vegetal mediante la producción de fitohormonas como auxinas y giberelinas, que estimulan el crecimiento de raíces y brotes. Además, solubilizan fosfatos y fijan nitrógeno, mejorando la disponibilidad de nutrientes esenciales para la planta. También participan en el biocontrol de patógenos al secretar metabolitos antimicrobianos que inhiben el crecimiento de organismos fitopatógenos y fortalecen las defensas naturales de la planta.
- Hongos endófitos: mejoran la absorción de nutrientes al incrementar la captación de macronutrientes como fósforo y nitrógeno, y micronutrientes como zinc y hierro, optimizando así la nutrición vegetal (Compant *et al.*, 2010). Además, contribuyen a la resistencia al estrés aumentando la tolerancia de las plantas a condiciones adversas como sequía y salinidad, y producen compuestos que protegen contra herbívoros y patógenos.
- Levaduras endófitas: secretan auxinas y sideróforos que promueven el crecimiento vegetal y mejoran la adquisición de hierro. También aportan protección frente a estrés abiótico al ayudar a las plantas a enfrentar toxicidad por metales pesados mediante la modulación en la absorción de estos elementos.
- Arqueas endófitas: aunque menos estudiadas, se ha identificado que pueden promover el crecimiento vegetal y mejorar la resistencia frente a enfermedades y estrés ambiental.
- Cianobacterias endófitas: ayudan en la fijación biológica de nitrógeno al formar asociaciones simbióticas con diversas plantas, aportando nitrógeno fijo que es esencial para el crecimiento vegetal. Además, su capacidad para producir metabolitos secundarios genera compuestos bioactivos que pueden beneficiar a la planta hospedera en su adaptación al entorno.

En conjunto, estos microorganismos endófitos desempeñan roles cruciales en la salud y desarrollo de las plantas, contribuyendo de forma directa a su nutrición, crecimiento y resistencia frente a estresores bióticos y abióticos.

- Producción de fitohormonas (auxinas, giberelinas, citoquininas)
- Solubilización de fósforo y movilización de potasio
- Fijación biológica de nitrógeno
- Producción de sideróforos y enzimas hidrolíticas
- Inducción de Resistencia Sistémica Inducida (ISR)



- Inhibición directa de patógenos por antibiosis

## 5. Endófitos y tolerancia al estrés abiótico

Los microorganismos endófitos juegan un papel esencial en la mitigación del estrés abiótico en plantas, activando mecanismos fisiológicos que mejoran la capacidad de adaptación frente a condiciones adversas. A continuación, se describen los tipos de estrés abiótico más relevantes, sus manifestaciones y los endófitos asociados.

### Estrés hídrico

El estrés hídrico es uno de los factores más limitantes para el crecimiento vegetal, ya que la falta o exceso de agua afecta la capacidad de las plantas para mantener la turgencia celular, la fotosíntesis y el equilibrio osmótico. Este tipo de estrés es común durante periodos de sequía prolongada o en situaciones de inundación que restringen la oxigenación del suelo. En estos contextos, microorganismos endófitos como *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas fluorescens* han mostrado inducir la acumulación de osmoprotectores como prolina y trehalosa, compuestos que permiten a las plantas conservar el agua y estabilizar sus membranas celulares (Wang *et al.*, 2023). Además, estos endófitos estimulan la síntesis de enzimas antioxidantes como superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT) y ascorbato peroxidasa (APX), reduciendo el daño oxidativo asociado al estrés hídrico. En hongos endófitos como *Piriformospora indica*, se ha documentado un efecto similar, con la inducción de antioxidantes que protegen las células vegetales de los efectos de la sequía (Waller *et al.*, 2005).

### Estrés salino

El estrés salino ocurre cuando las plantas están expuestas a altas concentraciones de sales en el suelo, lo que genera un desequilibrio osmótico e iónico que compromete la absorción de agua y nutrientes esenciales. Este tipo de estrés es frecuente en áreas costeras, suelos irrigados con agua de baja calidad o regiones áridas. Bacterias halotolerantes como *Azospirillum brasilense* y *Enterobacter cloacae* modulan la homeostasis iónica, favoreciendo la retención de potasio y la exclusión de sodio en los tejidos vegetales, reduciendo así los efectos tóxicos de las sales (Egamberdieva *et al.*, 2011). Además, levaduras endófitas como *Candida tropicalis* contribuyen a la resistencia salina mediante la síntesis de trehalosa, un disacárido que estabiliza las membranas celulares y evita la pérdida de agua en ambientes hiperosmóticos.



## **Metales pesados**

La presencia de metales pesados como cadmio, plomo y arsénico en el suelo constituye un estrés abiótico severo, ya que estos elementos interfieren en procesos metabólicos clave, generando un exceso de especies reactivas de oxígeno (ROS) y afectando negativamente la estructura celular. Este tipo de estrés es común en suelos contaminados por actividades industriales o el uso intensivo de pesticidas. Hongos endófitos como *Trichoderma harzianum* sintetizan ácidos orgánicos que quelan los metales pesados, limitando su movilidad y reduciendo su toxicidad en los tejidos vegetales (Domka *et al.*, 2023). Por su parte, bacterias como *Pseudomonas putida* inducen la producción de fitoquelatinas y metalotioneínas, proteínas que secuestran los metales y los almacenan en compartimentos celulares específicos, evitando así que interfieran con procesos metabólicos esenciales (Ma *et al.*, 2016).

## **Temperaturas extremas**

El estrés térmico abarca tanto las altas como las bajas temperaturas, las cuales pueden desestabilizar las proteínas, dañar las membranas celulares y afectar el funcionamiento enzimático de las plantas. Durante olas de calor o heladas repentinas, bacterias endófitas como *Azospirillum brasilense* incrementan la síntesis de prolina y antioxidantes, mitigando el daño celular causado por el congelamiento o el sobrecalentamiento (Bano & Fatima, 2009). Asimismo, *Bacillus cereus* ha demostrado activar la expresión de proteínas de choque térmico (HSPs), las cuales estabilizan proteínas esenciales y mantienen la integridad celular en condiciones de alta temperatura (Khan *et al.*, 2020).

## **Estrés oxidativo**

El estrés oxidativo se produce cuando las plantas generan un exceso de especies reactivas de oxígeno (ROS) como resultado del impacto de otros factores abióticos, como la sequía, la salinidad o la presencia de metales pesados. Estos ROS causan daños a lípidos, proteínas y ácidos nucleicos, comprometiendo la viabilidad celular. En este contexto, hongos endófitos como *Piriformospora indica* y bacterias como *Bacillus amyloliquefaciens* han demostrado incrementar la síntesis de antioxidantes enzimáticos que neutralizan los ROS y protegen las células vegetales del daño oxidativo (Jogawat *et al.*, 2013). Asimismo, cianobacterias endófitas del género *Nostoc spp.* producen compuestos antioxidantes como glutatión y ascorbato, los cuales contribuyen a la detoxificación del exceso de ROS y mejoran la tolerancia de las plantas frente al estrés oxidativo (Ran *et al.*, 2010).



## 6. Aplicaciones biotecnológicas

- Formulación de biofertilizantes microbianos
- Uso como biopesticidas y en biocontrol de enfermedades
- Consorcios microbianos para adaptación al cambio climático
- Edición genética de microbiomas endofíticos
- Agricultura regenerativa con enfoque en microbiota beneficiosa

## CONCLUSIONES

Los microorganismos endófitos son aliados clave en la fisiología vegetal. Su capacidad para mejorar el crecimiento, modular la respuesta al estrés y proteger contra patógenos los convierte en herramientas valiosas para una agricultura sostenible. La integración de estos organismos en prácticas agrícolas debe ser una prioridad en el contexto actual de crisis climática y demanda alimentaria global.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Bano, A., & Fatima, M. (2009). Salt tolerance in *Zea mays* (L.) following inoculation with *Rhizobium* and *Pseudomonas*. *Biology and Fertility of Soils*, 45(4), 405–413. <https://doi.org/10.1007/s00374-008-0344-9>
2. Bergman, B., Johansson, C., & Söderbäck, E. (1992). *The Nostoc–Gunnera symbiosis*. *New Phytologist*, 122(3), 379–400. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1992.tb00067.x>
3. Chow, C., Padda, K. P., Puri, A., & Chanway, C. P. (2022). An archaic approach to a modern issue: Endophytic archaea for sustainable agriculture. *Current Microbiology*, 79(11), 322. <https://doi.org/10.1007/s00284-022-03016-y>
4. Compant, S., Clément, C., & Sessitsch, A. (2010). Plant growth-promoting bacteria in the rhizosphere and endosphere of plants: Their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. *Plant and Soil*, 321(1–2), 305–339. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.11.024>
5. Domka, A., Jędrzejczyk, R., Ważny, R., Gustab, M., Kowalski, M., Nosek, M., Bizan, J., Puschenreiter, M., Vaculík, M., Kováč, J., & Rozpądek, P. (2023). Endophytic yeast protect plants against metal toxicity by inhibiting plant metal uptake through an ethylene-dependent mechanism. *Plant, Cell & Environment*, 46(1), 268–287. <https://doi.org/10.1111/pce.14473>
6. Egamberdieva, D., Kucharova, Z., Davranov, K., Berg, G., Makarova, N., Azarova, T., ... (2011).



- Bacteria able to control foot and root rot and to promote growth of cucumber in salinated soils. *Biological Fertility of Soils*, 47, 197–205. <https://doi.org/10.1007/s00374-010-0523-3>
7. Fontana, D. C., de Paula, S., Torres, A. G., de Souza, V. H. M., Pascholati, S. F., Schmidt, D., & Dourado Neto, D. (2021). Endophytic fungi: Biological control and induced resistance to phytopathogens and abiotic stresses. *Pathogens*, 10(5), 570. <https://doi.org/10.3390/pathogens10050570>
  8. Jogawat, A., Saha, S., Bakshi, M., Dayaman, V., Kumar, M., Dua, M., Nevo, E., & Johri, A. K. (2013). Piriformospora indica rescues growth diminution of rice seedlings during high salt stress. *Plant Signaling & Behavior*, 8(10), e26891. <https://doi.org/10.4161/psb.26891>
  9. Kandel, S. L., Joubert, P. M., & Doty, S. L. (2017). Bacterial endophyte colonization and distribution within plants. *Microorganisms*, 5(4), 77. <https://doi.org/10.3390/microorganisms5040077>
  10. Khan, M. A., Asaf, S., Khan, A. L., Jan, R., Kang, S.-M., Kim, K.-M., & Lee, I.-J. (2020). Thermotolerance effect of plant growth-promoting *Bacillus cereus* SA1 on soybean during heat stress. *BMC Microbiology*, 20, 175. <https://doi.org/10.1186/s12866-020-01822-7>
  11. Ling, L., Tu, Y., Ma, W., Feng, S., Yang, C., Zhao, Y., ... & Zhang, J. (2020). A potentially important resource: Endophytic yeasts. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36(8), 110. <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02889-0>
  12. Ma, Y., Rajkumar, M., & Freitas, H. (2016). Beneficial role of bacterial endophytes in heavy metal phytoremediation. *Journal of Environmental Management*, 174, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.047>
  13. Oukala, N., Gourion, B., & Rossi, M. (2021). Bacterial endophytes: The hidden actor in plant immune responses against biotic stress. *Plants*, 10(5), 1012. <https://doi.org/10.3390/plants10051012>
  14. Ran, L., Larsson, J., Vigil-Stenman, T., Nylander, J. A. A., Ininbergs, K., Zheng, W., ... & Bergman, B. (2010). Genome erosion in a nitrogen-fixing vertically transmitted endosymbiotic multicellular cyanobacterium. *PLoS ONE*, 5(7), e11486. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0011486>
  15. Rosenblueth, M., & Martínez-Romero, E. (2006). Bacterial endophytes and their interactions with



- hosts. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 19(8), 827–837. <https://doi.org/10.1094/MPMI-19-0827>
16. Santoyo, G., Moreno-Hagelsieb, G., Orozco-Mosqueda, M. del C., & Glick, B. R.(2016). Plant growth-promoting bacterial endophytes. *Microbiological Research*, 183,92–99. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.008>
17. Waller, F., Achatz, B., Baltruschat, H., Fodor, J., Becker, K., Fischer, M., ... Kogel, K. H. (2005). *The endophytic fungus Piriformospora indica reprograms barley to salt-stress tolerance, disease resistance, and higher yield. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(38), 13386–13391. <https://doi.org/10.1073/pnas.0504423102>
18. Wang, Y.-L., & Zhang, H.-B. (2023). *Assembly and function of seed endophytes in response to environmental stress. Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33(9), 1119–1129. <https://doi.org/10.4014/jmb.2303.03004>

