

Hongos endófitos en la agricultura: caso cafeto

Endophytic fungi in agriculturae: The case of coffee tree

Alba Leonorilda Solís-Pérez¹ , Dimas Mejía-Sánchez¹ , Misael Martínez-Bolaños² ,
Mateo Vargas-Hernández³ , Luciano Martínez-Bolaños^{4*} 

¹Maestría en Protección Vegetal, Departamento de Parasitología Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 Carretera México-Texcoco, 56230, Texcoco, Estado de México, México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Rosario Izapa, km. 18 Carretera Tapachula-Cacahoatán, 30780, Tuxtla Chico, Chiapas, México.

³Maestría en Protección Vegetal, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo.

⁴Maestría en Protección Vegetal, Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria del Sur Sureste, 86800, Teapa, Tabasco, México.

*Autor para correspondencia: lmartinezb@chapingo.mx

Fecha de recepción:

27 de mayo de 2023

Fecha de aceptación:

19 de agosto de 2023

Disponible en línea:

31 de diciembre de 2023

Este es un artículo en acceso abierto que se distribuye de acuerdo a los términos de la licencia Creative Commons.



Reconocimiento-

NoComercial-

CompartirIgual 4.0

Internacional

(CC BY-NC-SA 4.0)

RESUMEN

Los microorganismos endófitos viven en simbiosis con las plantas dentro de sus tejidos sanos. Ayudan a las plantas a tolerar afectaciones por patógenos y daños por plagas, y les permiten adaptarse a condiciones extremas de salinidad y temperatura. La roya anaranjada, *Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome, afecta al cultivo del café y su manejo se basa en aplicaciones de fungicidas químicos; sin embargo, ante los retos y desafíos mundiales de la agricultura, es necesario generar estrategias sostenibles. Los hongos endófitos representan un potencial para el control biológico de enfermedades.

PALABRAS CLAVE

Hemileia vastatrix, control biológico, agricultura sostenible.

ABSTRACT

Endophyte microorganisms live in symbiosis inside of plant healthy tissues. These fungi help their hosts to tolerate pathogen affectation, pest damage, and to adapt to extreme conditions of salinity and temperatures. The coffee leaf rust, *Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome, affects coffee crop, and its management is based on chemical fungicide application. In view of the world agriculture challenges, it is necessary to develop sustainable strategies. The endophytic fungi represent a potential for biological control of plant diseases.

KEYWORDS

Hemileia vastatrix, biological control, sustainable agriculture.

INTRODUCCIÓN

Los hongos endófitos son microorganismos mutualistas que viven en el interior de los tejidos de las plantas. Permiten a sus hospederos tolerar el estrés por condiciones abióticas, como salinidad y altas temperaturas, y afectaciones bióticas ocasionadas por plagas y enfermedades, al producir metabolitos secundarios y suprimir el crecimiento de organismos patógenos (Backman y Sikora 2008; Moghaddam et al. 2021). El uso de los hongos endófitos, como agentes de control biológico de enfermedades, es de interés en cultivos de importancia como el café, en especial, para el manejo de la roya anaranjada, causada por el hongo *Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome. La roya afecta a tejidos foliares, causando la defoliación y reducción de la producción de granos (Schieber y Zentmyer 1984).

El aislamiento y estudio de hongos endófitos se ha realizado en plantas medicinales y acuáticas (Zheng et al. 2022), así como en hortalizas (Díaz-González et al. 2020) y en frutales como el mango (Vieira et al. 2014) y el cacao (Mejía et al. 2008). En plantas de café, los microorganismos endófitos se han aislado en Colombia y Puerto Rico (Santamaría y Bayman 2005; Vega et al. 2010). En México, se han hecho aislamientos de hongos endófitos en Veracruz (Saucedo-García et al. 2014) y en Chiapas (Vega et al. 2010). En cuanto a pruebas de antagonismo de hongos endófitos en plantas de café, no se tienen reportes. En el presente estudio, se llevó a cabo una revisión del estado del arte sobre microorganismos endófitos, con el objetivo de potencializar su uso para el manejo sostenible de la roya anaranjada en el cultivo de café.

EL CAFÉ EN EL MUNDO

El café se cultiva en más de 80 países y es la segunda bebida más vendida a nivel internacional. Entre 2022 y 2033, Brasil fue el principal productor de café cereza en el mundo, con un volumen de producción de 3,984,000 ton; mientras que México se ubicó como el décimo productor, con el 2.1 por ciento de la producción mundial (FAO 2022). En cuanto a exportación, Brasil fue el principal exportador de café cereza, con 2,460,000 ton y los principales importadores fueron: la Unión Europea con 2,850,000 ton, seguido de Estados Unidos, Japón, Rusia, Suiza, Canadá, Corea y otros (USDA 2023).

EL CAFÉ EN MÉXICO

México presenta una superficie sembrada de café de 702,686.02 ha y una superficie cosechada de 648,487.10 ha; un volumen de producción de 1,025,034.80 ton de café cereza y un rendimiento promedio de 1.58 ton ha⁻¹. Los principales estados productores son: Chiapas, Veracruz y Oaxaca. En ese sentido, el estado de Chiapas presentó un volumen de producción de 385,703.05 ton y un aporte al total nacional de 37.6 por ciento. Aproximadamente, 35 por ciento de la producción de café en México es café arábigo de altura, cultivado por arriba de los 2,950 msnm, y 14 por ciento del total de producción es de café robusta (*Coffea canephora* Pierre ex A. Frehner) (SIAP 2022).

ORIGEN Y DISTRIBUCIÓN DE LA ROYA ANARANJADA

El género *Hemileia* tiene más de 50 especies; de ellas, *H. vastatrix* y *H. coffeicola* afectan al cultivo del café. *H. vastatrix*, causante de la roya anaranjada del cultivo de café, es un hongo parásito obligado perteneciente a la clase basidiomiceta; su principal forma de multiplicación es a través de las uredosporas (Fernandes et al. 2009). La roya anaranjada se observó por primera vez en 1861, en café silvestre en África Oriental (Schieber y Zentmyer 1984); posteriormente, se dispersó a otras partes del mundo. En México, la roya se detectó en 1981, en el ejido Felipe Carrillo Puerto, del municipio de Tapachula, Chiapas (Fraire 1982) y después se distribuyó a otros estados, en donde la intensidad de la enfermedad se acentuó después de 2013, causando grandes pérdidas a los productores. Desde el primer registro de la roya anaranjada, se han reportado más de 49 razas; sin embargo, la raza II es la que presenta mayor incidencia y distribución a nivel mundial (Gichuru et al. 2012).

CICLO PATOLÓGICO DE LA ROYA ANARANJADA

El ciclo de roya anaranjada se divide en etapas: 1) liberación y diseminación de la uredospora y depósito sobre la hoja; 2) germinación de uredospora y penetración al hospedero, el hongo desarrolla hifas, coloniza las células vegetales e induce la presencia de los pri-

meros síntomas, y 3) el hongo produce uredosporas infecciosas.

CONTROL BIOLÓGICO

El control biológico es la interacción entre un organismo que suprime el crecimiento y desarrollo de otro organismo (plaga) y evita afectaciones en un cultivo; se caracteriza por presentar soluciones a largo plazo, y es amigable con el ambiente (Pal y McSpadden 2006). En café y cacao se utiliza el control biológico aumentativo, el cual consiste en la detección de enemigos naturales del organismo plaga a controlar, en sitios diferentes a su lugar de origen y, el posterior aumento de los niveles del mismo en áreas seleccionadas. Un ejemplo de este tipo de control es el uso de *Lecanicillium lecanii*, un hongo con potencial micoparasítico de la roya en regiones cafetaleras distintas al sitio de origen de *H. vastatrix* (Zewdie et al. 2021).

HONGOS ENDÓFITOS

El microbioma vegetal es el total de microorganismos que habitan los tejidos internos (endófitos) y externos (ectofíticos) de una planta; estos incluyen a hongos y bacterias, que pueden ser fitopatógenos o mutualistas. El término endófito se conoce desde el siglo XIX y fue propuesto por Henrich Anton de Bary en 1866. Un microorganismo endófito vive durante una parte o toda su vida en los espacios inter e intracelulares de las plantas, sin ocasionar ningún síntoma o efecto negativo (Rodríguez et al. 2009). Los hongos endófitos habitan en el apoplasto de la célula, en los tejidos vasculares y, en algunos casos, en el interior celular de las raíces, tallos y hojas de las plantas (Fontana et al. 2021).

Los hongos endófitos presentan potencial para uso agronómico y médico, como controladores biológicos y productores de sustancias bioactivas (Mejía et al. 2008). La interacción con sus hospederos es compleja, ya que puede ser mutualista y antagonista. Un endófito mutualista le confiere a la planta gran potencial adaptativo frente a condiciones adversas que generen estrés, ya sean de tipo abiótico (salinidad, acidez, sequía y alta temperatura) o biótico (plagas y patógenos) (Moghaddam et al. 2021; Nadeem et al. 2014). Entre los mecanismos de regulación propuestos para conferir tolerancia a sequía, se encuentran el aumento

del tamaño de raíces y hojas, la regulación de la apertura y cierre de los estomas, la activación del sistema de protección antioxidación y la acumulación de osmolitos (Ek-Ramos 2020); estos últimos son compuestos orgánicos de bajo peso molecular que permiten el ajuste osmótico y facilitan la absorción de agua por parte de la planta (Yancey 2005).

Los microorganismos endófitos y las plantas presentan una relación de antagonismo balanceado, el cual varía de acuerdo con el ambiente y etapa de desarrollo de ambos organismos; así, cuando los factores de defensa de la planta y virulencia del hongo están en equilibrio, se establece una relación endófito. Bajo condiciones de senescencia o estrés de la planta, el hongo se expresa en forma patogénica, causando una enfermedad (Sánchez-Fernández et al. 2013).

Los hongos endófitos promueven el crecimiento de las plantas a través de mecanismos directos e indirectos. En el mecanismo directo, los microorganismos endófitos regulan la producción de hormonas como la citoquinina, el etileno y las auxinas; además, mejoran la disponibilidad de nutrientes del suelo, la solubilización de hierro y fósforo, así como la fijación de nitrógeno y producción de sideróforos (Cheng et al. 2022); éstos son moléculas secretadas por microorganismos que actúan como agentes quelantes para atrapar hierro en presencia de otros metales y reducirlo a Fe^{2+} , que es una forma más soluble y aprovechable para la planta (Dybas et al. 1995). En el mecanismo indirecto, los organismos endófitos previenen el daño a las plantas, al liberar enzimas, antibióticos, cianuro de hidrógeno y compuestos volátiles que inhiben las actividades de los patógenos e inducen resistencia sistémica, mediante la regulación del ácido jasmónico o salicílico, y la desintoxicación de metabolitos de defensa constitutivos del hospedero (Schulz et al. 2015; Segaran y Sathiavelu 2019).

Los microorganismos endófitos producen tanto enzimas (proteasa, xilanasa, amilasa y celulasa), como promotores de crecimiento (ácido indol-3-acético) (Suebrasri et al. 2020). En relación con la planta, el endófito induce el incremento de la tasa de fotosíntesis y la transpiración; además, la protege contra patógenos mediante la inducción de las respuestas de defensa sistémicas y la síntesis de metabolitos con actividad biológica, que repelen o propician la muerte de los organismos plaga (Fontana et al. 2021). De igual forma,

algunos endófitos pueden producir nanopartículas metálicas que actúan contra patógenos (Naik 2020).

Algunos géneros de hongos endófitos utilizados como agentes de control biológico de enfermedades de plantas son: *Fusarium* (Silva et al. 2012), *Curvularia* y *Trichoderma* (Cui et al. 2021); sin embargo, existen géneros de hongos que son fitopatógenos y pueden comportarse como endófitos. Un ejemplo es *Colletotrichum* y sus especies *C. tofielidae* (Hiruma et al. 2016), *C. siamense* (Munasinghe et al. 2017) y *C. gloeosporioides* (Rabha et al. 2014).

Mecanismos de defensa

Los hongos endófitos emplean diversos mecanismos en el control de fitopatógenos para inducir resistencia a través de la expresión génica. La resistencia de las plantas previene la colonización y el desarrollo del patógeno; esta respuesta implica mecanismos de defensa de la planta de tipo bioquímico o estructural. Los hongos endófitos pueden proteger a las plantas mediante la producción de metabolitos secundarios, como antibióticos y toxinas (Latz et al. 2018), antifúngicos e inmunosupresores (Adeleke y Babalola 2021), terpenoides, policétidos, esteroides, quinonas, flavonoides, alcaloides y péptidos, o por medio de compuestos que inhiben el crecimiento de fitopatógenos, como la producción de celulasa, glucanasa, quitinasa y lactonas (Goates y Mercier 2009). De igual forma, los hongos endofíticos secretan proteínas ricas en cisteína para incrementar su compatibilidad con la planta hospedante, e inducir respuestas fisiológicas y de defensa (Ku et al. 2020). Cui et al. (2021) mencionan que el estrés ambiental, el cambio climático o la senescencia de la planta pueden facilitar la conversión de endófitos a patógenos.

Diversidad y distribución de los hongos endófitos tropicales

Las vegetaciones naturales poco perturbadas presentan una gran biodiversidad de plantas que albergan a diferentes especies de microorganismos, como los hongos endófitos; sin embargo, la composición de especies endofíticas es muy diferente entre las zonas áridas, templadas y tropicales. Estos microorganismos producen diversos metabolitos secundarios que presentan una

alta diversidad, estructura espacial y afinidad de hospedante entre endófitos foliares (Moghaddam et al. 2021; Santamaría y Bayman 2005). Un taxón endófito frecuente en los trópicos es la familia Xylariaceae, la cual se puede encontrar en raíz, tallos, hojas, flores y frutos. Asimismo, pueden encontrarse en cada tejido de la hoja, como en el parénquima, haces vasculares y dermis. En la rizósfera, los endófitos pueden infiltrarse fácilmente desde el entorno externo del suelo hacia las raíces de las plantas y colonizarla (Ghaffari et al. 2019). Los hongos endófitos aislados con mayor frecuencia en cítricos incluyen especies de *Colletotrichum*, *Cladosporium*, *Fusarium* y *Xylaria* (Araújo et al. 2001). Sánchez-Fernández et al. (2013) estimaron cerca de 1.3 millones de especies de hongos endófitos por descubrir.

Forma de transmisión

Los hongos endófitos se transmiten verticalmente de la planta parental a sus descendientes a través de semillas (Selosse y Schardl 2007); el endófito infecta el embrión de la semilla y permanece inactivo hasta la germinación (Lugtenberg et al. 2016). Otra forma es la transmisión horizontal, en la cual el endófito se transmite a través de esporas presentes en el suelo o aire, las cuales penetran a través de la epidermis o por heridas naturales, y germinan dentro del hospedante (Sánchez-Fernández et al. 2013).

Los hongos endófitos se clasifican como Clavicipitaceae y no Clavicipitaceae. Los clavicipitáceos están asociados con pastos y pertenecen filogenéticamente al orden de los hipocreales. Protegen a las plantas hospedantes contra insectos plaga que se alimentan de ellas, y se caracterizan por ser simbioses biótrophos obligados y se transmiten de manera vertical y horizontal. Los hongos endófitos no clavicipitáceos colonizan las plantas vasculares, helechos, coníferas y angiospermas. Este tipo de hongos colonizan tejidos aéreos y subterráneos, se transmiten de manera vertical y horizontal, confieren tolerancia a valores tóxicos de pH, salinidad o temperatura, incluso, estos microorganismos permiten la supervivencia de las plantas en condiciones extremas (Rodríguez et al. 2009). Se clasifican en tres grupos, con base en el tipo de tejido vegetal que colonizan: *a*) tejidos aéreos y subterráneos, los cuales se transmiten de manera vertical y horizontal; *b*) organismos que solo colonizan tejidos aéreos, y se

transmiten de manera horizontal, y c) los que sólo colonizan tejidos subterráneos y se transmiten de manera horizontal (Ek-Ramos 2020).

Nuevos enfoques de los hongos endófitos en la agricultura

Actualmente, el desarrollo científico se enfoca en la generación de sistemas de producción agrícola sostenibles; esto implica el uso de bioinoculantes y bioplaguicidas que produzcan altos rendimientos con el mínimo impacto para el ambiente. En ese sentido, los metabolitos secundarios de hongos endófitos se utilizan para el desarrollo de bioproductos, como bionematicidas, biofungicidas, bioinsecticidas y bioherbicidas. Algunos estudios sobre los beneficios de los hongos endófitos son los realizados por Clay et al. (1993), quienes obtuvieron una alta mortalidad de *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) al ser alimentadas con *Festuca arundinacea* Schreb. con, el hongo endófito *Acremonium* spp. Mejía et al. (2008) indican que *Colletotrichum gloeosporioides* y *Clonostachys rosea* presentaron un efecto sobre *Phytophthora* sp. y *Moniliophthora roreri* en plantas de cacao. *C. gloeosporioides* también mostró efecto antagonista sobre *Alternaria alternata* en la planta medicinal *Cornus officinalis* (Zhao et al. 2020). El hongo endófito *Neocamarosporium chichastianum*, indujo tolerancia al estrés hídrico y salino en plantas de cebada (Moghaddam et al. 2021).

Respecto a la actividad entomopatógena de los hongos endofíticos, Rajab et al. (2023) mostraron el potencial entomopatógeno de *Beauveria bassiana* en el control de *Galleria mellonella* L. en el cultivo de pepino. Lu et al. (2022) indican que *Acremonium alternatum* controla a la polilla *Plutella xylostella*, plaga del cultivo de frijol. De igual forma, Ek-Ramos et al. (2013) señalan que el hongo *Phomopsis* sp. endófito de las plantas de algodón reduce la actividad herbívora de larvas en este cultivo.

En cuanto a la interacción de los hongos endófitos contra organismos fitopatógenos, Cheng et al. (2020) señalan que *Piriformospora indica* induce resistencia contra *Fusarium oxysporum* en *Musa* spp., debido al incremento de la producción de enzimas antioxidantes. Kim et al. (2007) indican que *Fusarium oxysporum* cepa EF119 actuó como agente de biocontrol contra *Phytophthora infestans* en el cultivo de tomate. Rabha et al. (2014) mencionan el efecto antagonista de

C. gloeosporioides aislado de *Camellia sinensis*, contra los patógenos del té, *Pestalotiopsis theae* y *Colletotrichum camelliae* (Douanla-Meli et al. 2013).

Algunos endófitos utilizados como biofertilizantes son las especies del género *Epichloë* (Kauppinen et al. 2016); en condiciones de alta salinidad, el endófito *Epichloë bromicola* aumenta la tolerancia de la cebada silvestre (*Hordeum brevisubulatum*) al estrés e incrementa su capacidad de germinación y el crecimiento (Wang et al. 2019). Clay et al. (1993) obtuvieron una alta mortalidad de *Spodoptera frugiperda* al ser alimentadas con *Festuca arundinacea* con el hongo endófito *Acremonium* spp. En el Cuadro 1, se presentan otros estudios sobre microorganismos endófitos y su impacto en cultivos agrícolas.

Hongos endófitos en plantas de café

Los primeros estudios de hongos endófitos en el cultivo de café fueron reportados por Rayner en 1948, y desde entonces se ha ampliado el campo de conocimiento sobre los hongos endófitos. En *Coffea* spp., los hongos endófitos se transmiten horizontalmente (Rodríguez et al. 2009) y se han aislado algunos hongos endófitos a partir de frutas, hojas, raíces y semillas. Santamaría y Bayman (2005) reportaron aislamientos de *Botryosphaeria*, *Colletotrichum*, *Guignardia* y *Xylaria* en Puerto Rico, a partir de tejidos foliares. Vega et al. (2010) identificaron a *Colletotrichum*, *Fusarium*, *Penicillium* y miembros de la familia Xylariaceae en Hawái, México, Puerto Rico y Colombia. Bongiorno et al. (2016) identificaron a *Colletotrichum*, *Trichoderma*, *Schizophyllum*, *Mycosphaerella*, *Cladosporium* y *Cercospora* en Brasil. En *Coffea arabica*, los géneros más comunes que se han aislado son: *Colletotrichum* spp., *Xylaria* spp. y *Guignardia* (Santamaría y Bayman 2005). Lu et al. (2022) aislaron hongos endófitos en plantas de café en China y el género más abundante fue *Colletotrichum* spp. Oliveira et al. (2014) en Brasil aislaron a *Colletotrichum gloeosporioides* y *Phyllosticta capitalensis*.

El uso de hongos endófitos como agentes de control biológico en el cultivo de café se reportó en un estudio en Perú por parte de Mamani-Huayhua et al. (2021), donde aislaron *Trichoderma* sp. En África, Kapeua-Ndacnou et al. (2023) aislaron a *Clonostachys* spp., el cual mostró potencial como antagonista sobre roya anaranjada.

Cuadro 1. Impacto de microorganismos endófitos en cultivos de importancia económica

| Especie /cultivo | Microorganismo endófito | Efecto benéfico | Referencia |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Maíz (<i>Zea mays</i>) | <i>Beauveria bassiana</i> | Entomopatígeno contra <i>Spodoptera frugiperda</i> | Russo et al. (2021) |
| Aguacate (<i>Persea americana</i> Mill.) | <i>Phyllosticta capitalensis</i> , <i>Lasiodiplodia gonubiensis</i> , <i>Neofuscococcum algeriense</i> | Producción orgánica | Shetty et al. (2016) |
| Banano (<i>Musa paradisiaca</i> L.) | <i>Trichoderma reesi</i> , <i>Rigidiporus vinctus</i> , <i>Sphingobacterium tabacisoli</i> | Estimulación de crecimiento y control de <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i> | Savani et al. (2021) |
| Arándano (<i>Vaccinium</i> sp.) | <i>Xylaria feejeensis</i> , <i>Gymnoascus reesii</i> , <i>Macrophomina phaseolina</i> | Biocontrol de <i>Fusarium odoratissimum</i> | Taping et al. (2023) |
| Manzano (<i>Malus pumila</i> Kitam.) | <i>Staphylococcus cohnii</i> , <i>S. hominis</i> , <i>Salmonella enterica</i> , <i>Leuconostoc mesenteroides</i> y <i>Candida santamariae</i> | Mayor vida post cosecha | Vaitiekunaite et al. (2022) |
| Magüey azul (<i>Agave tequilana</i> F.A.C.Weber) | <i>Cladosporium tenuissimum</i> | Resistencia a enfermedades foliares (<i>Alternaria mali</i>) | Hirakue y Sugiyama (2018) |
| <i>Agave sisalana</i> Perrine | <i>Bacillus tequilensis</i> | Absorción de nutrientes | Beltrán-García et al. (2014) |
| <i>Agave sisalana</i> Perrine | <i>Bacillus</i> sp. | Control de pudriciones en Agave. | De Souza et al. (2021) |
| Café (<i>Coffea arabica</i> L.) | <i>Trichoderma atroviride</i> | Control de la roya del café (<i>H. vastatrix</i>) | Wulansari et al. (2023) |
| Cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.) | <i>Trichoderma asperellum</i> | Control de muerte descendente (<i>Ceratobasidium theobromae</i>) | Rosmana et al. 2015 |
| Canela (<i>Cinnamomum cassia</i> Siebold) | <i>Penicillium citrinum</i> , <i>Xylaria curta</i> y <i>Clonostachys rosea</i> . | Control de pudrición radicular en canela causadas por <i>Phytophthora</i> sp. | Dang et al. (2023) |

Finalmente, el uso de hongos endófitos requiere el muestreo de diferentes agroecosistemas, de donde se puedan aislar cepas con potencial para el manejo de factores bióticos o abióticos que afectan el desarrollo de los cultivos agrícolas. Además, es necesario el uso de las técnicas moleculares para detectar la diversidad microbiológica, las cuales difícilmente pueden ser encontradas con los métodos tradicionales.

CONCLUSIONES

Los microorganismos endófitos presentan un potencial para la bioprotección de las plantas sin causar un impacto negativo al ambiente; por ello, son una alternativa para atender los retos y desafíos de la agricultura mundial, la cual requiere el desarrollo de una agricultura sostenible. En el cultivo de café existen pocos estudios al respecto, por lo cual es necesario impulsar

investigaciones con énfasis en microorganismos endófitos para el manejo de la roya del café.

LITERATURA CITADA

- Adeleke BS, Babalola OO. 2021. Pharmacological potential of fungal endophytes associated with medicinal plants: A review. *Journal of Fungi* 7: 147. <http://doi.org/10.3390/jof7020147>
- Araújo WL, Maccheroni WJr, Aguilar-Vildoso CI, Barroso PA, Saridakis HO, Azevedo JL. 2001. Variability and interactions between endophytic bacteria and fungi isolated from leaf tissues of citrus rootstocks. *Canadian Journal Microbiology* 47: 229-236. <https://doi.org/10.1139/w00-146>
- Backman AP, Sikora AR. 2008. Endophytes: An emerging tool for biological control. *Biological Control* 46: 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.03.009>

- Beltrán-García MJ, White JF, Prado FM, Prieto KR, Yamaguchi LF, Torres MS, Fato MJ, Medeiros MHG, Mascio PD. 2014. Nitrogen acquisition in *Agave tequilana* from degradation of endophytic bacteria. *Sci. Rep.* 4: 6938. <https://doi.org/10.1038/srep06938>
- Bongiorno VA, Rhoden SA, García A, Polonio JC, Azevedo JL, Pereira JO, Pamphile JA. 2016. Genetic diversity of endophytic fungi from *Coffea arabica* cv. IAPAR-59 in organic crops. *Annals of Microbiology* 66: 855-865. <https://doi.org/10.1007/s13213-015-1168-0>
- Cheng C, Li D, Qi Q, Sun X, Anue MR, David BM, Zhang Y, Hao X, Zhang Z, Lai Z. 2020. The root endophytic fungus *Serendipita indica* improves resistance of banana to *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* tropical race 4. *European Journal of Plant Pathology* 156: 87-100. <https://doi.org/10.1007/s10658-019-01863-3>
- Cheng X-F, Xie M-M, Li Y, Liu B-Y, Liu C-Y, Wu Q-S, Kuča K. 2022. Effects of field inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and endophytic fungi on fruit quality and soil properties of Newhall navel orange. *Applied Soil Ecology* 170: 104308. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104308>
- Clay K, Marks S, Cheplick GP. 1993. Effects of insect herbivory and fungal endophyte infection on competitive interactions among grasses. *Ecology* 74: 1767-1777. <https://doi.org/10.2307/1939935>
- Cui R, Lu X, Chen X, Malik WA, Wang D, Wang J, Wang S, Guo L, Chen C, Wang X, Wang X, Dai M, Ye W. 2021. A novel raffinose biological pathway is observed by symbionts of cotton *Verticillium dahliae* to improve salt tolerance genetically on cotton. *Journal of Agronomy and Crop Science* 207: 956-969. <https://doi.org/10.1111/jac.12556>
- Dang QN, Burgess TI, McComb J, Pham TQ, Le BV, Tran TV, Nguyen LT, Hardy GESJ. 2023. Fungal and bacterial endophytes antagonistic to *Phytophthora* species causing root rot in *Cinnamomum cassia*. *Mycological Progress* 22: 28. <https://doi.org/10.1007/s11557-023-01878-5>
- De Souza JT, Silva ACM, Santos AFJ, Santos PO, Alves PS, Cruz-Magalhães V, Marbach PAS, Loguercio LL. 2021. Endophytic bacteria isolated from both healthy and diseased *Agave sisalana* plants are able to control the bole rot disease. *Biological Control* 157: 104575. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104575>
- Díaz-González S, Marín P, Sánchez R, Arribas C, Kruse J, González-Melendi P, Brunner F, Sacristán S. 2020. Mutualistic fungal endophyte *Colletotrichum tofieldiae* Ct0861 colonizes and increases growth and yield of maize and tomato plants. *Agronomy* 10: 1493. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101493>
- Douanla-Meli C, Langer E, Mouafo FT. 2013. Fungal endophyte diversity and community patterns in healthy and yellowing leaves of *Citrus limon*. *Fungal Ecology* 6: 212-222. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2013.01.004>
- Dybas M, Tatar GM, Criddle CS. 1995. Localization and characterization of carbon tetrachloride transformation activity of *Pseudomonas* sp. strain KC. *Applied and Environmental Microbiology* 61: 758-762. <https://doi.org/10.1128/aem.61.2.758-762.1995>
- Ek-Ramos MJ. 2020. Endófitos microbianos para el control de plagas y enfermedades agrícolas. En: Arredondo BHC, Tamayo MF, Rodríguez LA, editores. *Fundamento y práctica del control biológico de plagas y enfermedades*. Montecillos, Editorial del Colegio de Postgraduados. P. 373-405.
- Ek-Ramos MJ, Zhou W, Valencia CU, Antwi JB, Kalns LL, Morgan GD, Kerns DL, Sword GA. 2013. Spatial and temporal variation in fungal endophyte communities isolated from cultivated cotton (*Gossypium hirsutum*). *PLoS ONE* 8: e66049. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066049>
- [FAO] Food and Agriculture Organization of the United States. [internet]. 2022. FAOSTAT. [citado 2023 octubre 5]. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/en/#compare>
- Fernandes RDC, Evans HC, Barreto RW. 2009. Confirmation of the occurrence of teliospores of *Hemileia vastatrix* in Brazil with observations on their mode of germination. *Tropical Plant Pathology* 34: 108-113. <https://doi.org/10.1590/S1982-56762009000200005>
- Fontana DC, De Paula S, Torres AG, De Souza VHM, Pascholati SF, Schmidt D, Neto DD. 2021. Endophytic fungi: Biological control and induced resistance to phytopathogens and abiotic stresses. *Pathogens* 10: 570. <https://doi.org/10.3390/pathogens10050570>
- Fraire VG. 1982. Coffee rust in Mexico. *Plant Disease* 67: 450. <https://doi.org/10.1094/PD-67-450>
- Ghaffari MR, Mirzaei M, Ghabooli M, Khatabi B, Wu Y, Zabet-Moghaddam M, Mohammadi-Nejad G, Haynes PA, Hajirezaei MR, Sepehri M, Salekdeh GH. 2019. Root endophytic fungus *Piriformospora indica* improves drought stress adaptation in barley by meta-

- bolic and proteomic reprogramming. *Environmental and Experimental Botany* 157: 197-210. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.10.002>
- Gichuru EK, Ithiru JM, Silva MC, Pereira AP, Varzea VMP. 2012. Additional physiological races of coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) identified in Kenya. *Tropical Plant Pathology* 37: 424-427. <https://doi.org/10.1590/S1982-56762012000600008>
- Goates BJ, Mercier J. 2009. Effect of biofumigation with volatiles from *Muscodor albus* on the viability of *Tilletia* spp. teliospores. *Canadian Journal Microbiology* 55: 203-206. <https://doi.org/10.1139/w08-104>
- Hirakue A, Sugiyama S. 2018. Relationship between foliar endophytes and apple cultivar disease resistance in an organic orchard. *Biological Control* 127: 139-144. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2018.09.007>
- Hiruma K, Gerlach N, Sacristán S, Nakano RT, Hacquard S, Kracher B, Neumann U, Ramírez D, Bucher M, O'Connell RJ, Schulze-Lefert P. 2016. Root endophyte *Colletotrichum tofieldiae* confers plant fitness benefits that are phosphate status dependent. *Cell* 165: 464-474. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.02.028>
- Kapeua-Ndacnou M, De Abreu LM, De Macedo DM, Da Nóbrega TF, Pereira CM, Evans HC, Barreto RW. 2023. Assessing the biocontrol potential of *Clonostachys* species isolated as endophytes from *Coffea* species and as mycoparasites of *Hemileia* rusts of coffee in Africa. *Journal of Fungi* 9: 248. <https://doi.org/10.3390/jof9020248>
- Kauppinen M, Saikkonen K, Helander M, Pirttilä AM, Wäli PR. 2016. *Epichloë* grass endophytes in sustainable agriculture. *Nature Plants* 2: 15224. <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.224>
- Kim H-Y, Choi GJ, Lee HB, Le S-W, Lim HK, Jang KS, Son SW, Lee SO, Cho KY, Sung ND, Kim J-C. 2007. Some fungal endophytes from vegetable crops and their anti-oomycete activities against tomato late blight. *Letters in Applied Microbiology* 44: 332-337. <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2006.02093.x>
- Ku Y-S, Cheng S-S, Gerhardt A, Cheung M-Y, Contador CA, Poon L-Y, Lam H-M. 2020. Secretory peptides as bullets: Effector peptides from pathogens against antimicrobial peptides from soybean. *International Journal of Molecular Sciences* 21: 9294. <https://doi.org/10.3390/ijms21239294>
- Latz MA, Jensen B, Collinge DB, Jørgensen HJL. 2018. Endophytic fungi as biocontrol agents: Elucidating mechanisms in disease suppression. *Plant Ecology & Diversity* 11: 555-567. <https://doi.org/10.1080/17550874.2018.1534146>
- Lu L, Karunaratna SC, Hyde KD, Suwannarach N, Elgorban AM, Stephenson SL, Al-Rejaie S, Jayawardena RS, Tibpromma S. 2022. Endophytic fungi associated with coffee leaves in China exhibited in vitro antagonism against fungal and bacterial pathogens. *Journal of Fungi* 8: 698. <https://doi.org/10.3390/jof8070698>
- Lugtenberg BJJ, Caradus JR, Johnson LJ. 2016. Fungal endophytes for sustainable crop production. *FEMS Microbiology Ecology* 92: fiw194. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiw194>
- Mamani-Huayhua G, Leon-Ttacca B, Palao-Iturregui LA, Borja-Loza YR. 2021. Biocontrol of coffee yellow rust (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.) with *Trichoderma* sp. Endophyte strains. *Cultivos Tropicales* 42: e01.
- Mejía LC, Rojas EI, Maynard Z, Van Bael S, Arnold AE, Hebban P, Samuels GJ, Robbins N, Herre EA. 2008. Endophytic fungi as biocontrol agents of *Theobroma cacao* pathogens. *Biological Control* 46: 4-14. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.01.012>
- Moghaddam MSH, Safaie N, Tedersoo L, Hagh-Doust N. 2021. Diversity, community composition, and bioactivity of cultivable fungal endophytes in saline and dry soils in deserts. *Fungal Ecology* 49: 101019. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2020.101019>
- Munasinghe MVK, Kumar NS, Jayasinghe L, Fujimoto Y. 2017. Indole-3-acetic acid production by *Colletotrichum siamense*, an endophytic fungus from *Piper nigrum* leaves. *Journal of Biologically Active Products from Nature* 7: 475-479. <https://doi.org/10.1080/22311866.2017.1408429>
- Nadeem SM, Ahmad M, Zahir ZA, Javaid A, Ashraf M. 2014. The role of mycorrhizae and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in improving crop productivity under stressful environments. *Biotechnology Advances* 32: 429-448. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.12.005>
- Naik BS. 2020. Biosynthesis of silver nanoparticles from endophytic fungi and their role in plant disease management. En: Kumar A, Radhakrishnan, editores. *Microbial Endophytes*. Sawston, Woodhead Publishing. P. 307-321. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819654-0.00012-0>
- Oliveira RRV, Souza RG, Lima TEF, Cavalcanti MAQ. 2014. Endophytic fungal diversity in coffee leaves (*Coffea arabica*) cultivated using organic and conventional crop

- management systems. *Mycosphere* 5: 523-530. <https://doi.org/10.5943/mycosphere/5/4/4>
- Pal KK, McSpadden GB. 2006. Biological control of plant pathogens. *The Plant Health Instructor* 2: 1117-1142. <https://doi.org/10.1094/PHI-A-2006-1117-02>
- Rabha AJ, Naglot A, Sharma GD, Gogoi HK, Veer V. 2014. In vitro evaluation of antagonism of endophytic *Colletotrichum gloeosporioides* against potent fungal pathogens of *Camellia sinensis*. *Indian Journal of Microbiology* 54: 302-309. <https://doi.org/10.1007/s12088-014-0458-8>
- Rajab L, Habib W, Gerges E, Gazal I, Ahmad M. 2023. Natural occurrence of fungal endophytes in cultivated cucumber plants in Syria, with emphasis on the entomopathogen *Beuveria bassiana*. *Journal of Invertebrate Pathology* 196: 107868. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2022.107868>
- Rodríguez RJ, White JrJF, Arnold AE, Redman RS. 2009. Fungal endophytes: Diversity and functional roles. *New Phytologist* 182: 314-330. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02773.x>
- Rosmana A, Samuels GJ, Ismaiel A, Ibrahim ES, Chaverri P, Herawati Y, Asman A. 2015. *Trichoderma asperellum*: A dominant endophyte species in cacao grown in Sulawesi with potential for controlling vascular streak dieback disease. *Tropical Plant Pathology* 40: 19-25. <https://doi.org/10.1007/s40858-015-0004-1>
- Russo ML, Jaber LR, Scorsetti AC, Vianna F, Cabello MN, Pelizza SA. 2021. Effect of entomopathogenic fungi introduced as corn endophytes on the development, reproduction, and food preference of the invasive fall army worm *Spodoptera frugiperda*. *Journal of Pest Science* 94: 859-870. <https://doi.org/10.1007/s10340-020-01302-x>
- Sánchez-Fernández RE, Sánchez-Ortiz BL, Sandoval-Espinosa YKM, Ulloa-Benítez Á, Armendáriz-Guillén B, García-Méndez MC, Macías-Rubalcava ML. 2013. Hongos endófitos: fuente potencial de metabolitos secundarios bioactivos con utilidad en agricultura y medicina. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 16: 132-146. [https://doi.org/10.1016/S1405-888X\(13\)72084-9](https://doi.org/10.1016/S1405-888X(13)72084-9)
- Santamaría J, Bayman P. 2005. Fungal epiphytes and endophytes of coffee leaves (*Coffea arabica*). *Microbial Ecology* 50: 1-8. <https://doi.org/10.1007/s00248-004-0002-1>
- Saucedo-García A, Anaya AL, Espinosa-García FJ, González MC. 2014. Diversity and communities of foliar endophytic fungi from different agroecosystems of *Coffea arabica* L. in two regions of Veracruz, Mexico. *PLoS ONE* 9: e98454. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098454>
- Savani Ak, Bhattacharyya A, Boro RC, Dinesh K, Swamy NJ. 2021. Exemplifying endophytes of banana (*Musa paradisiaca*) for their potential role in growth stimulation and management of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* causing panama wilt. *Folia Microbiologica* 66: 317-330. <https://doi.org/10.1007/s12223-021-00853-5>
- Schieber E, Zentmyer GA. 1984. Coffee rust in the Western Hemisphere. *Plant Disease* 68: 89-93. <https://doi.org/10.1094/PD-68-89>
- Schulz B, Haas S, Junker C, André N, Schobert M. 2015. Fungal endophytes are involved in multiple balanced antagonisms. *Current Science* 109: 39-45.
- Segaran G, Sathivelu M. 2019. Fungal endophytes: A potent biocontrol agent and a bioactive metabolites reservoir. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 21: 101284. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101284>
- Selosse M-A, Schardl CL. 2007. Fungal endophytes of grasses: hybrids rescued by vertical transmission? An evolutionary perspective. *New Phytologist* 173: 452-458. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01978.x>
- [SIAP] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. [internet]. 2022. Cierre de Producción Agrícola 2022. [citado 2023 agosto 31]. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/732617/Caf_Mayo.pdf
- Silva HSA, Tozzi JPL, Terrasan CRF, Bettiol W. 2012. Endophytic microorganisms from coffee tissues as plant growth promoters and biocontrol agents of coffee leaf rust. *Biological Control* 63: 62-67. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2012.06.005>
- Shetty KG, Rivadeneira DV, Jayachandran K, Walker DM. 2016. Isolation and molecular characterization of the fungal endophytic microbiome from conventionally and organically grown avocado trees in South Africa. *Mycological Progress* 15: 977-986. <https://doi.org/10.1007/s11557-016-1219-3>
- Suebrasri T, Harada H, Jogloy S, Ekprasert J, Boonlue S. 2020. Auxin-producing fungal endophytes promote growth of sunchoke. *Rhizosphere* 16: 100271. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100271>
- Taping JMF, Borja BT, Bretaña BLP, Tanabe MEN, Cabasan MTN. 2023. Fungal endophytes as potential biocontrol agent of Panama disease banana. *Egyptian Journal of Biological Pest Control* 33: 84. <https://doi.org/10.1186/s41938-023-00727-7>

- [USDA] United States Department of Agriculture. [internet]. 2023. Coffee: World markets and trade. [citado 2023 junio 23]. Disponible en: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/coffee.pdf>
- Vaitiekunaite D, Bruzaite I, Snitka V. 2022. Endophytes from blueberry (*Vaccinium* sp.) fruit: Characterization of yeast and bacteria via label-free surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS). *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 275: 121158. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2022.121158>
- Vega FE, Simpkins A, Aime MC, Posada F, Peterson SW, Rehner SA, Infante F, Castillo A, Arnold AE. 2010. Fungal endophyte diversity in coffee plants from Colombia, Hawai'i, Mexico and Puerto Rico. *Fungal Ecology* 3: 122-138. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2009.07.002>
- Vieira WAS, Michereff SJ, De Morais MA, Hyde KD, Camara MPS. 2014. Endophytic species of *Colletotrichum* associated with mango in northeastern Brazil. *Fungal Diversity* 67: 181-202. <https://doi.org/10.1007/s13225-014-0293-6>
- Wang Z, Li C, White J. 2019. Effects of *Epichloë* endophyte infection on growth, physiological properties and seed germination of wild barley under saline conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science* 206: 43-51. <https://doi.org/10.1111/jac.12366>
- Wulansari NK, Prihatiningsih N, Utami DR, Wiyantono W, Riyanto A. 2023. Isolation and identification of antagonistic fungi on coffee leaf rust in the Dieng highlands of Banjarnegara, Indonesia. *Egyptian Journal of Biological Pest Control* 33: 72. <https://doi.org/10.1186/s41938-023-00718-8>
- Yancey PH. 2005. Organic osmolytes as compatible, metabolic and counteracting cytoprotectants in high osmolarity and other stresses. *Journal of Experimental Biology* 208: 2819-2830. <https://doi.org/10.1242/jeb.01730>
- Zewdie B, Tack AJM, Ayalew B, Adugna G, Nemomissa S, Hylander K. 2021. Temporal dynamics and biocontrol potential of a hyperparasite on coffee leaf rust a landscape In Arabica coffee's native range. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 311: 107297. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107297>
- Zhao X, Hu Z, Hou D, Xu H, Song P. 2020. Biodiversity and antifungal potential of endophytic fungi from the medicinal plant *Cornus officinalis*. *Symbiosis* 81: 223-233. <https://doi.org/10.1007/s13199-020-00696-7>
- Zheng H, Yu Z, Jiang X, Fang L, Qiao M. 2022. Endophytic *Colletotrichum* species from aquatic plants in southwest China. *Journal of Fungi* 8: 87. <https://doi.org/10.3390/jof8010087>