

Microorganismos antagonistas: una alternativa para el control biológico de enfermedades fúngicas presentes en el cultivo de café (*Coffea arabica* L.)

Nayelli Ayatzol Vidal-Martínez¹, Rosalba Argumedo-Delira¹,
Jesús Ricardo Sánchez-Pale², Roberto Gregorio Chiquito-Contreras¹,
Daniel González-Mendoza³ y Gabriela Sánchez-Viveros^{1,*}

¹ Posgrado en Ciencias Agropecuarias, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Veracruzana. Circuito Gonzalo Aguirre Beltrán s/n, Zona Universitaria C.P. 91090, Xalapa, Veracruz, México

² Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Literario 100 Col. Centro C.P. 50000, Toluca del Lerdo, México

³ Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California, Av. Álvaro Obregón y Julián Carrillo s/n Col. Nueva C.P. 21100, Mexicali, Baja California, México

Resumen

El control biológico aprovecha la capacidad de algunos microorganismos para controlar las poblaciones de vectores en plantas; y poco se conoce de los mecanismos de control con antagonistas contra agentes fúngicos. El café tiene importancia en el sector agrícola con prestigio a nivel mundial. Existen factores bióticos que delimitan y disminuyen la calidad de la producción del grano de café, destaca la presencia de enfermedades causadas principalmente por hongos como *Hemileia vastatrix* Berkeley & Bromme, causante de la roya anaranjada del café, *Cercospora coffeicola* Berkeley & Curtis que causa la mancha de hierro y *Mycena citricolor* Berkeley & Curtis, de ojo de gallo. La presente revisión tiene por objetivo recopilar información bibliográfica disponible, respecto al control biológico como alternativa para la agricultura moderna, las interacciones y mecanismos antagónicos a patógenos entre microorganismos, con énfasis en el control biológico de enfermedades causadas por hongos fitopatógenos en el cultivo de café (*Coffea arabica* L.). Las citas bibliográficas muestran que es necesario realizar investigaciones enfocadas en el aislamiento, identificación y selección de microorganismos entre las comunidades microbianas, con énfasis en el discernimiento de los mecanismos que influyen en el ciclo de vida de los patógenos y, definir con ello la posible aplicación biotecnológica durante la producción de café.

Palabras clave: Antagonismo, bacterias, control biológico, hongos, fitopatógenos.

Antagonist microorganism: an alternative for the biological control of fungal diseases present in coffee crop (*Coffea arabica* L.)

Abstract

Biological control takes advantage of the ability of some microorganisms to control populations of vectors in plants; however, little is known about the mechanisms of control with antagonists against fungal agents. Coffee is important in agricultural sector at a global level. There are some biotic factors which

* Autor para correspondencia: gabsanchez@uv.mx

Cita del artículo: Vidal-Martínez NA, Argumedo-Delira R, Sánchez-Pale JR, Chiquito-Contreras RG, González-Mendoza D, Sánchez-Viveros G (2021). Microorganismos antagonistas: una alternativa para el control biológico de enfermedades fúngicas presentes en el cultivo de café (*Coffea arabica* L.). ITEA-Información Técnica Económica Agraria 117(3): 214-226. <https://doi.org/10.12706/itea.2020.042>

limit and reduce quality in the production of coffee bean, specially is relevant the presence of diseases caused mainly by fungi such as *Hemileia vastatrix* Berkeley & Bromme causing orange coffee rust, *Cercospora coffeicola* Berkeley & Curtis which causes brown eye spot and *Mycena citricolor* Berkeley & Curtis, causing American leaf spot disease. The present review compiles available information related to biological control in modern agriculture, interactions and antagonist mechanisms to pathogens between microorganism emphasizing in biological control of diseases caused by phytopathogenic fungi in coffee (*Coffea arabica* L.). In this sense, research focused in isolation, identification and selection of microorganisms from microbial communities is needed, highlighting the description of mechanisms which influence the life cycle of pathogens in order to define the possible biotechnological application during the coffee production.

Keywords: Antagonist, bacteria, biological control, fungi, phytopathogens.

Introducción

El control biológico se define como el uso de organismos vivos para disminuir la población de organismos plaga específicos, de manera menos dañina al ambiente (Eilenberg *et al.*, 2001). Estos enemigos naturales deben ser muy específicos y atacar a un grupo limitado de especies plaga que pudieran estar relacionadas. Esta es la razón para la identificación apropiada de las plagas y enfermedades presentes en una plantación, así como distinguir los enemigos naturales que permita un control biológico seguro y eficaz (Dreistadt, 2014).

Actualmente, existe un gran interés en la búsqueda de microorganismos con capacidad antagónica de patógenos, presentes en cultivos de importancia económica y enfocados hacia una agricultura alternativa; así como por sus beneficios en el potencial activo y en la disminución del uso de productos químicos, lo que disminuye el impacto ecológico que causan (Villamil *et al.*, 2015; Sánchez-García *et al.*, 2017). Se ha demostrado que el uso de microorganismos endófitos y el manejo de los sistemas agroforestales, coadyuva a regular el impacto negativo de patógenos y controlar vectores causantes de enfermedades en las plantas, en la promoción del crecimiento, la reducción de la severidad de una enfermedad y en la inducción de mecanismos de defensa de las plantas (Silva *et al.*, 2012; Cerda *et al.*, 2020).

Por otro lado, el café es un producto de prestigio social a nivel mundial, y de los principales cultivos de importancia del sector agrícola, por la generación de ingresos en más de 15 mil millones de dólares al año, e involucra en el proceso productivo cerca de 20 millones de personas de manera directa o indirecta (Temis-Pérez *et al.*, 2011). A pesar de generar importantes divisas, existen factores bióticos y abióticos que delimitan y disminuyen la calidad del grano de café. Se destaca el constante desafío al que se enfrenta esta actividad agrícola para el control de plagas, como la broca (*Hypothenemus hampei* Ferrari), el minador de la hoja (*Leucoptera coffeella* Guérin) y de enfermedades como la Roya del café (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Bromme) considerada como la patología de mayor importancia económica (Canet y Soto, 2016; Torres *et al.*, 2020), seguida de Ojo de gallo (*Mycena citricolor* Berkeley & Curtis) y Mancha de hiebro (*Cercospora coffeicola* Berkeley & Curtis) (SENASICA, 2018). El objetivo de esta revisión es recopilar la información bibliográfica disponible, respecto al control biológico como alternativa para la agricultura moderna, las interacciones y mecanismos antagónicos a patógenos entre microorganismos, con énfasis en el control biológico de enfermedades causadas por hongos fitopatógenos en el cultivo de café (*Coffea arabica* L.).

Control biológico

Poco se conoce de los microorganismos antagonistas que se encuentran en los ecosistemas de manera natural y que ejercen un papel protector para las plantas, al reducir el daño causado por enfermedades ocasionadas por agentes patogénicos. La presencia de estos últimos genera un impacto negativo para muchos cultivos de importancia agrícola, por lo que el productor se ve obligado a incrementar la aplicación de productos químicos, aun cuando sea restringido el uso de plaguicidas, debido al grave impacto que ocasionan al ambiente y a los propios consumidores. Es por ello, que en la actualidad se ha incrementado las investigaciones encaminadas a métodos de control más eficientes y seguros (Gerbore et al., 2014; Sánchez-García et al., 2017).

El control biológico es un método atractivo para el manejo de plagas causadas por insectos y por enfermedades, que resultan de las interacciones entre organismos, dependiendo del ambiente en el que se están llevando estas asociaciones. Es una alternativa eficiente y económica, que tiene una amplia difusión por su efecto positivo en el rendimiento y posibilidad de producir una agricultura orgánica, en especial este método puede operar en diversas situaciones gracias a las investigaciones dirigidas a la identificación de los mecanismos de acción de cada especie (Nega, 2014; Sánchez-García et al., 2017).

Varios autores definen al control biológico como la acción para mantener a una población de organismos plaga en baja densidad disminuyendo sus efectos, con la ayuda de parásitos, depredadores, patógenos, microorganismos, o el uso de sus productos como agentes de control que pueden estar presentes de manera natural o ser introducidos (Guédez et al., 2008; Baron et al., 2019). Existen diversos métodos de control biológico, los cuales incluyen grupos de microorganismos con capacidad antagonista, en los que destacan los hongos y bacterias. Los productos elaborados con estos

microorganismos pueden ser aplicados directamente en las semillas, por inmersión de plántulas, aplicación al suelo, por aspersión foliar y en frutos (Bhattacharjee y Dey, 2014).

De acuerdo con Helmuth (2000) y Guédez et al. (2008), el control biológico se puede clasificar en: 1) **Control biológico clásico**: consiste en introducir enemigos naturales que son exóticos para el lugar y favorecer su reproducción masiva, por la ausencia de enemigos naturales nativos que pueden generar agentes de control eficaces. 2) **Control biológico inundativo**: reside en la liberación controlada y masiva de enemigos naturales cuando la reproducción de un enemigo natural no es suficiente, controlando la plaga. 3) **Control biológico inoculativo**: se define como la liberación de una pequeña cantidad de enemigos naturales al inicio del ciclo del cultivo, aguardando que estos se establezcan, se reproduzcan y, en las próximas generaciones continúen controlando la plaga durante un tiempo prolongado.

Interacción entre planta y microorganismos benéficos

Las interacciones entre microorganismos en los ecosistemas, varían dependiendo de la especie y el ambiente; éstas interacciones pueden llegar a ser sinérgicas, mutualistas, antagónicas o de competencia. Las plantas requieren reconocer a estos microorganismos para responder a ellos de manera apropiada (Cano, 2011). Una planta puede llegar a albergar una gran cantidad de comunidades microbianas, que pueden proliferar dentro de varios órganos, en las raíces y en la superficie de las hojas; estos pueden ayudar de manera directa o indirecta en la protección hacia patógenos o en la promoción del crecimiento (Bulgarelli et al., 2013).

Las comunidades de microorganismos que tienen como hábitat la planta, se denominan

bioma microbiano y pueden generar efectos positivos en diversos procesos, como la germinación de semillas, el vigor de las plantas, el crecimiento y desarrollo, así como en mejorar la nutrición, incrementar la productividad y disminuir la incidencia de enfermedades. Algunos grupos microbianos tienen la capacidad de disminuir el estrés produciendo enzimas con acción antioxidante, así como también, participar en la rizorremediación pudiendo acumular metales pesados que amenazan el desarrollo de la planta (Huang et al., 2013).

Entre los microorganismos benéficos asociados a las plantas en la zona de la rizosfera, se destacan las bacterias fijadoras de nitrógeno, rizobacterias promotoras del crecimiento PGPR (*Plant growth-promoting rhizobacteria*, por sus siglas en inglés) hongos endo- y ectomicorrizicos y hongos promotores del crecimiento (León y Rojas, 2015). La presencia o ausencia de estos microorganismos está relacionada con la cantidad y calidad de los exudados radicales y de las interacciones microbianas que ocurren en la rizosfera (Raaijmakers et al., 2009). Algunas especies bacterianas, como las PGPR tienen la capacidad de colonizar las raíces y promover el crecimiento de las plantas mediante la mineralización de la materia orgánica. Otras ejercen acción de control biológico de patógenos, la fijación de nitrógeno, la solubilización de fósforo, el aumento en la disponibilidad de micronutrientes y la promoción del crecimiento en raíces (Pii et al., 2015). En la filósfera, las bacterias pueden influir en el crecimiento de las plantas, suprimir o estimular la colonización y la infección de tejidos por patógenos presentes en la planta (Yadav et al., 2010).

Control de patógenos por microorganismos

Existe un gran interés por la búsqueda de alternativas biológicas para el control de patógenos de las plantas que permitan disminuir

la aplicación de productos químicos, entre estas opciones destaca el uso de agentes microbianos de control biológico. Por lo general, los fitopatógenos tienen antagonistas biológicos y en los últimos años el empleo de bacterias, hongos filamentosos y levaduras han sido utilizados en programas de control sobre diferentes patógenos de interés agrícola (Hernández-Lauzardo et al., 2007). Aproximadamente el 10 % de los microorganismos aislados, tienen la capacidad de inhibir el crecimiento de patógenos, con características de agresividad, persistencia, rápido crecimiento y capacidad de colonizar el medio donde se encuentra el agente causal (Ulloa-Ogaz et al., 2015).

Algunos microorganismos que se han utilizado como agentes microbianos de control son las bacterias de los géneros *Agrobacterium*, *Bacillus*, *Pseudomonas* y en hongos los géneros de *Ampelomyces*, *Candida*, *Coniothyrium* y *Trichoderma*, por tener diversos mecanismos de acción. Las principales características de un microorganismo seleccionado como agente antagonista son: 1) capacidad para colonizar superficies y persistir; 2) mayor habilidad para adquirir nutrientes; 3) capacidad de adaptación y sobrevivencia a diferentes condiciones ambientales; 4) estabilidad genética; 5) eficacia en bajas concentraciones; 6) bajos requerimientos de elementos nutricionales especiales y; 7) eficacia en una amplia gama de microorganismos patógenos (Izzeddin y Medina, 2011; Ulloa-Ogaz et al., 2015).

Mecanismos de acción de los microorganismos antagonistas

La filogenética de diversos microorganismos con capacidad natural para actuar como antagonistas ante varios patógenos vegetales ha cobrado interés, sin embargo, para poder implementarla de manera más adecuada, es de suma importancia discernir los mecanismos de

acción para desarrollar procesos seguros de aplicación, así como de elección de cepas eficientes (Allori Stazzonelli et al., 2014; Ulloa-Ogaz et al., 2015). Por lo cual, es indispensable la identificación y comprensión de los mecanismos de acción entre antagonistas y patógenos, así como el tipo de ambiente en donde se desarrollan satisfactoriamente puesto que, estos microorganismos dependen de los factores bióticos y abióticos para expresar su potencial, lo que permitirá seleccionar los agentes más eficaces para el control biológico (Cano, 2011; Nega, 2014).

Dentro de los mecanismos de acción asociados a microorganismos antagonistas (Figura 1) destaca la competencia por espacio y nutrientes, antibiosis, el parasitismo o el micoparasitismo en el cual el microorganismo antagonista parasita las células del patógeno y degrada su pared celular, la retracción de la membrana plasmática y desorganización de citoplasma (Romero-Cortes et al., 2015). La

fungistasis tiene que ver con la imposición de dormancia por el controlador biológico, al limitar nutrientes como el carbono al patógeno (De Boer et al., 2003). Otros mecanismos son la inducción de la resistencia en las plantas, la depredación, así como la secreción de metabolitos tóxicos volátiles y la producción de enzimas líticas (Bhattacharjee y Dey, 2014; Ulloa-Ogaz et al., 2015).

Algunos de los mecanismos asociados con el efecto antagonístico de especies como *Bacillus* spp. y *Pseudomonas* spp., son por contacto como hiperparasitismo y depredación; la producción de compuestos con actividad antimicrobiana y la resistencia sistémica inducida (Haddad et al., 2013; Villarreal-Delgado et al., 2018). Para las especies de *Bacillus* destaca la producción de antibióticos como los lipopéptidos no ribosomales que incluyen surfactinas, itaurinas y fengicinas con actividad antibacteriana y antifúngica que van a alterar procesos celulares del patógeno como el

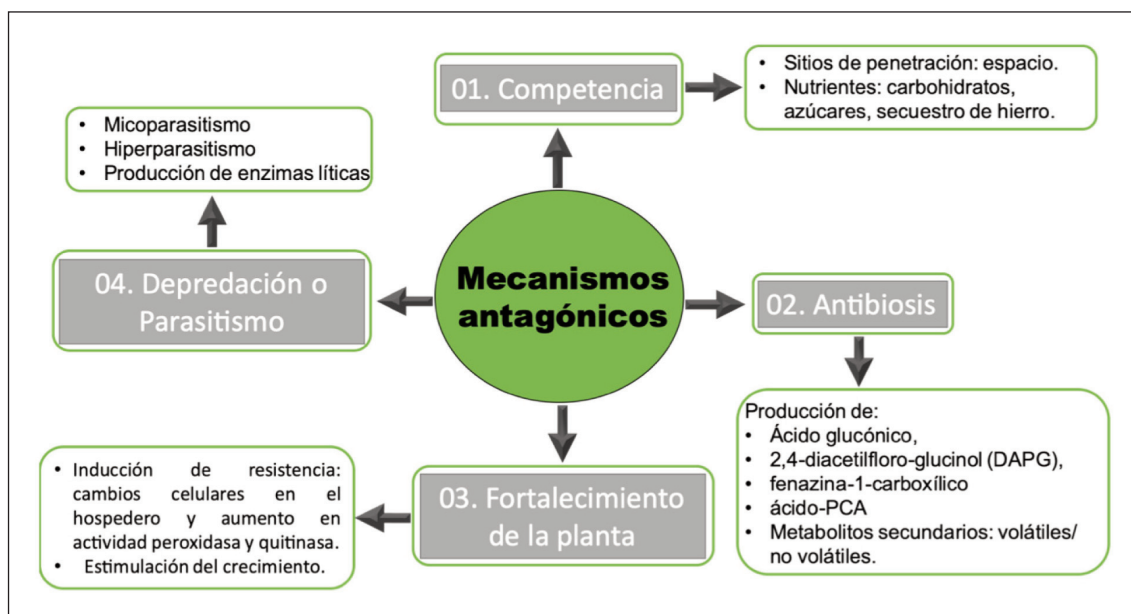


Figura 1. Mecanismos en microorganismos (Suarez et al., 2009; Cano, 2011; Ditix et al., 2015).
Figure 1. Mechanisms in microorganisms (Suarez et al., 2009; Cano, 2011; Ditix et al., 2015).

metabolismo energético, la homeostasis intracelular de calcio y el procesamiento de RNA (Lanna-Filho et al., 2010; Villarreal-Delgado et al., 2018). Además de la antibiosis, los lipopéptidos favorecen el establecimiento de *Bacillus* al regular la motilidad y la formación de biopelículas sin embargo, su estudio *in situ* es complejo (Mora et al., 2015). Otro de los mecanismos del género *Bacillus* más reportados contra patógenos fúngicos es la excreción de enzimas líticas (quitinasas y β -glucanasas) que van a degradar los principales polisacáridos que conforman la pared celular de hifas de patógenos como *Rhizoctonia solani*, *Botrytis elliptica* y *Colletotrichum lagenarium* (Martínez-Absalón et al., 2014; Shafi et al., 2017). Diversos géneros de *Bacillus* con capacidad de control biológico sintetizan sideróforos, regulando la disponibilidad de hierro a través de su quelatación (Fe^{3+} -sideroforo) limitando el crecimiento y colonización de patógenos dependientes de hierro y; para *Pseudomonas* se reporta la producción de antibióticos como el 2,4-diacetilfloroglucinol, supresor natural en el suelo, así como la pioluteorina, pirrolnitrina y síntesis de enzimas oxido-reductasas con efecto directo sobre los patógenos (Scharf et al., 2014; Soto et al., 2018).

En el caso de *Trichoderma*, es un hongo oportunista de rápido crecimiento y antagonista de hongos patógenos, oomicetos y nematodos por la competición de espacio y nutrientes. Otro mecanismo de este antagonista es el micoparasitismo, que incluye el reconocimiento del huésped, ataque, penetración y muerte. Durante este proceso el hongo segrega algunos metabolitos secundarios (trichodermina, dermadina, suzukacilina, viridina, alameticina) que degradan la pared celular, e inhibe el crecimiento de otros microorganismos. *Trichoderma* puede parasitar la hifa del patógeno, realizar diversos cambios en la fisiología del hospedante y penetrar la pared celular por la acción hidrolí-

tica de enzimas como quitinasas y glucanasas; otro mecanismo reportado para este hongo es la antibiosis. Cabe mencionar que los metabolitos secundarios producidos por *Trichoderma* dependen del tipo de cepa y se han clasificado en tres categorías: 1) antibióticos volátiles como 6-pentil- α -pirona y aquellos derivados del isocianuro; 2) compuestos solubles en agua (ácido heptenoico) y 3) oligopéptidos ricos en ácido γ -aminobutírico (Khan et al., 2020; Thapa et al., 2020).

***Hemileia vastatrix* (Roya amarilla del café)**

Es un hongo biótrofo o parasito obligado que infecta a las hojas del café. Se han reportado cerca de 32 razas de roya que atacan especies de género *Coffea*, principalmente a *arabica*, *canephora* y *liberica*. La raza II es la que prevalece en la mayoría de los países cafecultores atacando todas las variedades cultivadas de *C. arabica*, que no expresa resistencia al patógeno (Cristancho-Ardila et al., 2007). El primer síntoma es la aparición de manchas de color amarillo-naranja o rojo-anaranjado en el envés de la hoja, que van aumentando de tamaño gradualmente, esto por el desarrollo de las uredosporas y teliosporas. Estas últimas pueden encontrarse en grupos compactos que generalmente se empalman entre las uredinosporas; que son las estructuras encargadas de la supervivencia e infección del hongo (Rivillas-Osorio et al., 2011). En daños severos, puede causar hasta el 60 % de defoliación originando una reducción en el rendimiento de la planta (Virginio y Astorga, 2015).

Microorganismos antagonísticos de *H. vastatrix*

En el control biológico de la roya de café se han evaluado hongos y bacterias, aislados de la superficie de las hojas, ramas y raíces de la planta (Silva et al., 2012; Mejía, 2015). Como

antagonistas de *H. vastatrix* se indica a *Bacillus subtilis* Cohn que reduce la infección en más de un 77 % en invernadero, al limitar el desarrollo de urediniosporas en la hoja, y disminuir el número de células madre de haustorios, aplicado ocho días previos a la inoculación de *H. vastatrix*; y el efecto protector de *Pseudomonas putida* Trevisan, se observó al ser aplicado cuatro horas antes en las hojas de café. Estas bacterias no solo producen metabolitos secundarios y enzimas (lipoxigenasas, β -glucanasas y quitinasas) que inhiben la germinación de la Roya, también inducen resistencia sistémica en la planta (Haddad et al., 2013; Rivillas-Osorio et al., 2011).

En el caso de los hongos *Acremonium byssoides* Gams & Lim, *Calcarisporium arbuscula* Preuss, *C. ovalisporum* Petch y *Sporothrix guttuliformis* Hoog, pueden colonizar e inhibir el desarrollo de las uredosporas y los tubos germinativos. Entre tanto, *Talaromyces wortmannii* Klöcker, *Lecanicillium lecanii* Zimm, *Verticillium hemileiae* Bouriquet y *V. lecanii* Zimm se han reportado como micoparasitos de *H. vastatrix* (Jackson et al., 2012; Haddad et al., 2013; Díaz-Vicente et al., 2014).

Shiomi et al. (2006), aislaron 44 cepas bacterianas endófitas de hojas y ramas de café, de las cuales 23 cepas presentaron capacidad para inhibir hasta 40 % la germinación de la uredosporas de *Hemileia vastatrix*. Se destacaron *Bacillus lentimorbus* Dutky, *B. Cereus* Frankland & Frankland, *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* Smith, *Klebsiella pneumoniae* Schroeter, *Klebsiella pneumoniae* Schroeter, *Pandora pnomenusa* Coeye, *Kocuria kristinae* Kloos, *Cedecea davisae* Grimont y *Acinetobacter calcoaceticus* Beijerinck. La eficacia varió según el momento de la aplicación, siendo más eficaz de 24 horas a 72 horas antes que el patógeno. Por otro lado, Silva et al. (2012), aislaron 234 cepas bacterianas y fúngicas de hojas, ramas y raíces de plantas de café de la variedad Mundo novo, de ellas, 119 cepas bacterianas presenta-

ron resultados superiores en comparación con el tratamiento control. *Escherichia fergusonii* Farmer, *Acinetobacter calcoaceticus* Brisou y Prévot y *Salmonella entérica* serovar Typhi, presentaron resultados positivos en producción de fosfatasa, producción de ácido indolacético, sideróforos, citoquininas y giberelinas, lo que podría relacionarse con la capacidad de bacterias endófitas en la promoción del crecimiento. Las cepas bacterianas *Brevibacillus choshinensis* Takagi, *Pectobacterium carotovorum* Jones, *Bacillus megaterium* Bary, *Microbacterium testaceum* Komagata & Lizuka y *Cedecea davisae* Grimont presentaron capacidad antagonica y reducción de severidad de la enfermedad en un 97 % y 100 %.

***M. citricolor* (Ojo de gallo)**

Ojo de gallo, gotera del cafeto, candelilla viuela y ojo de pavo real, son los nombres por el cual se le conoce a la enfermedad causada por *M. citricolor*, la cual fue descubierta por primera vez en Colombia por Michelsen en 1880 (IICA, 1999). El daño se puede observar principalmente en plantaciones con exceso de sombra con especies forestales, alta humedad relativa, baja luminosidad, poca ventilación y altas precipitaciones. Las hojas de café son la principal estructura de afectación, causando la defoliación que conduce a la disminución fotosintética de la planta, lo que perjudica su desarrollo y producción (Rivillas-Osorio y Castro-Toro, 2011).

El impacto económico causado por esta enfermedad es diverso en las diferentes zonas cafetaleras en Latinoamérica. En Puerto Rico se han estimado pérdidas de hasta un 75 %, en Costa Rica se han visto afectadas hasta un 15 % del total de hectáreas sembradas con café y en Guatemala se reporta una incidencia del 49 %. En México, *M. citricolor* se encuentra presente en diversas zonas cafetaleras, por lo que se considera de importancia

económica a pesar de que las pérdidas no sean de consecuencias, sin embargo, esta enfermedad se encuentra bajo vigilancia epidemiológica fitosanitaria debido a las pérdidas descritas en otros países (SENASICA, 2014), *Mycena citricolor* Berkeley & Curtis tiene un amplio rango de plantas hospederas, entre las que destaca el níspero (*Eriobotrya japonica* Thunb), el cacao (*Theobroma cacao* L.), el café (*Coffea arabica* L.), guamo churito (*Inga vera* Willd), anturios (*Anthurium* spp.), begonias (*Begonia* spp), claveles (*Dianthus* spp), entre otras plantas que sirven de sombra para el café y ornamentales (Rivillas-Osorio y Castro-Toro, 2011).

Microorganismos antagónicos de *M. citricolor*

Son pocas las investigaciones encaminadas a la búsqueda de microorganismos con capacidad antagónica ante *M. citricolor*. Khan et al. (2020), indican que la efectividad antagónica de *Trichoderma longibrachiatum* Rifai es debido a una mezcla de metabolitos secundarios (Tricodimerol, Bislongiquinólido, Sorbicilinas, Bisvertinol, Bisvertinolona), que causan lisis de las hifas del patógeno. Por su parte, Vargas (1984) señaló la efectividad de *Trichoderma* sp. en conjunto con un fungicida elaborado a base de oxicloruro de cobre (Cobox), favoreciendo de manera notable la disminución de las lesiones. Sin embargo, los resultados obtenidos al evaluar de manera individual a *T. harzianum* no favoreció a este hongo. En contra parte, Salas (1970) encontró resultados positivos al confrontar *in vitro* a *T. harzianum* con *M. citricolor*, observando la capacidad del antagonista al parasitar y provocar lisis en micelio y cabecillas del hongo fitopatógeno. Mora et al. (1989), indican la capacidad antagónica de aislamientos bacterianos en cafetos con presencia de *Mycena citricolor* Berkeley & Curtis, observando la destrucción de las esporas fúngicas después de la

inoculación con la suspensión bacteriana, que producen exoenzimas hidrolíticas, impidiendo progreso de la enfermedad. Quesada-Chanto y Jiménez-Ulate (1996), describieron una actividad antifúngica en la evaluación del extracto filtrado libre de células, obtenido del crecimiento de *Bacillus* sp., concluyendo como una alternativa con potencial para el control de dicho patógeno.

***C. coffeicola* (Mancha de hierro)**

C. coffeicola es una de las enfermedades más antiguas del cultivo de café, siendo un problema fitosanitario desde la plántula en el vivero hasta el campo. En vivero se observa la defoliación, afectando notablemente el crecimiento de las plantas siendo inadecuadas para la siembra. En cultivos con baja fertilización, el patógeno causa daño en los granos, favoreciendo la entrada para otros hongos, así como su caída prematura llegando a causar pérdidas del 15 % al 30 % (Lacerda et al., 2013). En México, ésta enfermedad se encuentra bajo vigilancia debido a los daños económicos que ha causado en los países cafetaleros.

Las lesiones en hojas causadas por *C. coffeicola* se describen como manchas anfigenas (por haz y envés), redondas de aproximadamente 1 mm a 3 mm de diámetro, el centro con una coloración blanco grisáceo, circundado por un anillo marginal uniforme de color rojizo o marrón. En los frutos, el pergamino se mancha y la pulpa se pega a los granos causando deformidad en la almendra (González et al., 2000). En cuanto a los factores climáticos que favorecen la presencia de este hongo, se destaca las altas temperaturas, presentando más daños en meses de verano y climas cálidos, por la noche y en días fríos, con altas humedad se puede favorecer las fructificaciones conidiales de aspecto grisáceo en ambos lados de la hoja (Rengifo-Guzmán et al., 2002).

Microorganismos antagónicos de *C. coffeicola*

Las investigaciones encaminadas al control biológico específicamente para la especie de *C. coffeicola* son muy escasas. Sirinunta y Akarapisarn (2015), evaluaron bacterias aisladas de la rizosfera de *C. arabica*, obteniendo dos bacterias del género de *Bacillus* ssp. con características antagónicas ante mancha de hierro, cuyos resultados inhibieron al hongo patógeno, aplicando la formulación de la bacteria 24 horas antes o después de la inoculación del patógeno.

Otros trabajos relacionados con el control biológico para el género de *Cercospora* mencionan la eficacia de *B. subtilis* ante el daño en *Lactuca sativa* L., observando una inhibición del 81 % (Srimai y Akarapisarn, 2014). Este grupo de bacterias también se han indicado como antagonista para *C. beticola* Sacc (Lindow y Brandl, 2003). En cuanto a hongos utilizados para el control de este fitopatógeno, destaca *Trichoderma* aislado de remolacha azucarera con un porcentaje de inhibición de 63,5 % hasta la inhibición de la germinación de conidios de *C. beticola* (Galletti et al., 2008).

Conclusión

Con base en los antecedentes bibliográficos expuestos, se puede afirmar que el control biológico representa una alternativa para la agricultura moderna, además es necesario realizar investigaciones enfocadas a conocer más a detalle las interacciones del bioma microbiano, la eficiencia antagónica, así como, los mecanismos de interacción entre los bacterias y hongos, que influyen en el ciclo de vida de los patógenos para definir su posible aplicación biotecnológica, durante la producción de café. El control biológico con microorganismos antagonistas promete ser una

técnica con potencial para el manejo de la Roya amarilla del café (*H. vastatrix*), Mancha de hierro (*C. coffeicola*) y Ojo de gallo (*M. citricolor*). Así mismo, resulta de interés aislar, identificar y seleccionar microorganismos antagónicos nativos, presentes en el microhabitat de una región cafetalera y generar agentes de control biológico para la agricultura moderna que no tuviera limitaciones abióticas para su multiplicación y mecanismo de acción.

Agradecimientos

El primer autor agradece la beca CONACyT para la realización de estudios de nivel doctoral.

Referencias bibliográficas

- Allori Stazonelli E, Yasem MG, Ploper LD (2014). Inhibición de *Sclerotinia sclerotiorum* por metabolitos volátiles y no volátiles producidos por especies nativas del género *Trichoderma*. Revista Agronomica del Noroeste Argentino 34(2): 197-199.
- Baron NC, Rigobelo EC, Zied DC (2019). Filamentous fungi in biological control: current status and future perspectives. Chilean Journal of Agricultural Research 79(2): 307-315. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392019000200307>
- Bhattacharjee R, Dey U (2014). An overview of fungal and bacterial biopesticides to control plant pathogens/diseases. African Journal of Microbiology Research 8(17): 1779-1762. <https://doi.org/10.5897/AJMR2013.6356>
- Bulgarelli D, Schlaeppi K, Spaepen S, van Themaat EVL, Schulze-Lefert P (2013). Structure and functions of the bacterial microbiota of plants. Annual Review of Plant Biology 64: 807-838.
- Canet G, Soto C (2016). Principales plagas y enfermedades del cafeto. En: La situación y tendencias de la producción de café en América Latina

- y el Caribe (Ed. Canet G, Soto C, Ocampo P, Rivera J, Navarro A, Guatemala GM, Villanueva S), pp. 22-42. IICA, CIATEJ. San José, Costa Rica.
- Cano MA (2011). Interacción de microorganismos benéficos en plantas: Micorrizas, *Trichoderma* spp. y *Pseudomonas* spp. una revisión. Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica 14(2): 15-31. <https://doi.org/10.31910/rudca.v14.n2.2011.771>
- Cerda R, Avelino J, Harvey CA, Gary C, Tixier P, Allinne C (2020). Coffee agroforestry systems capable of reducing disease-induced yield and economic losses while providing multiple ecosystem services. *Crop Protection* 134: 105149. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105149>
- Cristancho-Ardila MA, Escobar-Ochoa C, Ocampo-Muñoz JD (2007). Evolución de razas de *Hemileia vastatrix* en Colombia. *Cenicafé* 58 (4): 340-359.
- De Boer W, Verheggen P, Klein Gunnewiek PJA, Kowalchuk GA, van Veen JA (2003). Microbial community composition affects soil fungistasis. *Applied and Environmental Microbiology* 69(2): 835-844. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.2.835-844.2003>
- Díaz-Vicente VM, Pinzón-Rincón EP, Pérez-Quintanilla JN, Cabrera-Alvarado ME, Magallanes-Cedeño R, De Coss-Flores ME (2014). El hongo *Verticillium hemileiae* Bouriquet, alternativa para el control de la roya del cafeto (*Hemileia vastatrix* Berk et Br.). *Agro productividad* 7(3): 58-62.
- Dreistadt SH (2014). Biological control and natural enemies of invertebrates. *Pest Notes Publication* 74140. Agriculture and Natural Resources. University of California. 6 pp.
- Eilenberg J, Hajek A, Lomer C (2001). Suggestions for unifying the terminology in biological control. *BioControl* 46: 387-400. <https://doi.org/10.1023/A:1014193329979>
- Galletti S, Burzi PL, Cerato C, Marinello S, Sala E (2008). *Trichoderma* as a potential biocontrol agent for *Cercospora* leaf spot of sugar beet. *BioControl* 53(1): 917-930. <https://doi.org/10.1007/s10526-007-9113-1>
- Gerbore J, Benhamou N, Vallance J, Le Floch G, Grizard D, Regnault-Roger C, Rey P (2014). Biological control of plant pathogens: advantages and limitations seen through the case study of *Pythium oligandrum*. *Environmental Science and Pollution Research* 21: 4847-4860. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1807-6>
- González A, Fajardo M, Leguizamón-Caycedo J, Cristancho-Ardila MA, Chaves-Cordoba B (2000). Variabilidad morfológica, patogénica y molecular de aislamientos de *Cercospora coffeicola*. *Cenicafé*. 51(4): 306-315.
- Guédez C, Castillo C, Cañizales L, Olivar R (2008). Control biológico: una herramienta para el desarrollo sustentable y sostenible. *Academia* 7(13): 50-74.
- Haddad F, Saraiva RM, Mizubuti ESG, Romeiro RS, Maffia LA (2013). Antifungal compounds as a mechanism to control *Hemileia vastatrix* by antagonistic bacteria. *Tropical Plant Pathology* 38(5): 398-405. <https://doi.org/10.1590/S1982-56762013000500004>
- Helmuth WR (2000). Manejo integrado y control biológico de plagas y enfermedades. Una guía teórica. Proexant. Ecuador. 115 p.
- Hernández-Lauzardo AN, Bautista-Baños S, Velázquez-del Valle MG, Hernández-Rodríguez A (2007). Uso de Microorganismos antagonistas en el control de enfermedades postcosecha en frutos. *Revista Mexicana de Fitopatología* 25(1): 66-74.
- Huang LF, Song LX, Xia XJ, Mao WH, Shi K, Zhou YH, Yu JQ (2013). Plant-soil feedbacks and soil sickness: From mechanisms to application in agriculture. *Journal of Chemical Ecology* 39: 232-242. <https://doi.org/10.1007/s10886-013-0244-9>
- IICA (1999). Desafíos de la cafecultura en Centroamérica. PROMECAFE, CIRAD, IRD, Francia. 496 p.
- Izzeddin N, Medina L (2011). Efecto del control biológico por antagonistas sobre patógenos en vegetales de consumo humano. *Salus* 15(3): 8-12.
- Jackson D, Skillman J, Vandermeer J (2012). Indirect biological control of the coffee leaf rust, *Hemileia vastatrix*, by the entomogenous fungus *Lecanicillium lecanii* in a complex coffee agroecosystem. *Biological Control* 61: 89-97. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2012.01.004>

- Khan KAA, Najeeb S, Hussain S, Xie B, Li Y (2020). Bioactive secondary metabolites from *Trichoderma* spp against phytopathogenic fungi. *Microorganisms* 8(6): 817 <https://doi.org/10.3390/microorganisms8060817>
- Lanna-Filho R, Ferro HM, Pinho RSC (2010). Controle biológico mediado por *Bacillus subtilis*. *Revista Trópica* 4:12-20.
- Lacerda PTB, Estevao SP, Stella SM, Pereida MF (2013). Progress of *Cercospora* leaf spot in coffee under different irrigation management systems and plating densities. *Coffee Science, Lavras* 8(2): 158-167.
- León LH, Rojas LM (2015). Determinación del potencial promotor del crecimiento vegetal de *Azotobacter* spp. aislados de la rizósfera de malezas en cultivos de maíz (*Zea mays* L.). *Scientia Agropecuaria* 6(4): 247-257. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2015.04.02>
- Lindow SE, Brandl MT (2003). Microbiology of the Phyllosphere. *Applied and environmental microbiology*. 69(4): 1875-1883. <http://dx.doi.org/10.1128/AEM.69.4.1875-1883.2003>
- Martínez-Absalón S, Rojas-Solís D, Hernández-León R, Prieto-Barajas C, Orozco-Mosqueda MC, Peña-Cabriales JJ, Sakuda S, Valencia-Cantero E, Santoyo G (2014). Potential use and mode of action of the new strain *Bacillus thuringiensis* UM96 for the biological control of the gray mold phytopathogen *Botrytis cinerea*. *Biocontrol Science Technology* 24: 1349-1362. <http://dx.doi.org/10.1080/09583157.2014.940846>
- Mejía LC (2015). Microbiomas y control biológico como alternativa de manejo de la roya anaranjada del café. En: *Memorias del Seminario Científico Internacional Manejo Agroecológico de la Roya del Café*. 16-18 septiembre 2014, Ciudad de Panamá, Panamá. pp. 47-54.
- Mora F, Ramírez C, Vargas E, Rodríguez T (1989). Empleo de bacterias antagonistas en el combate de la enfermedad Ojo de Gallo del café causada por *Mycena citricolor* (Berk & Curt) Sacc. *Turrialba* 39(3): 346-352.
- Mora I, Cabrefiga J, Montesinos E (2015). Cyclic lipopeptide biosynthetic genes and products, and inhibitory activity of plant-associated *Bacillus* against phytopathogenic bacteria. *PLoS One* 10: e0127738. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0127738>
- Nega A (2014). Review on concepts in Biological Control of Plant Pathogens. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare* 4(27): 33-54.
- Pii Y, Mimmo T, Tomasi N, Terzano R, Cesco S, Crecchio C (2015). Microbial interactions in the rhizosphere: beneficial influences of plant growth-promoting rhizobacteria on nutrient acquisition process. A review. *Biology and Fertility of Soil* 51: 403-415. <https://doi.org/10.1007/s00374-015-0996-1>
- Quesada-Chanto F, Jiménez-Ulate F (1996). Short communication: *In vitro* evaluation of a *Bacillus* sp. for the biological control of the coffee phytopathogen *Mycena citricolor*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 12(1): 97-98.
- Raaijmakers JM, Paulitz TC, Steinberg C, Alabouvette C, Moëgne-Loccoz Y (2009). The rhizosphere: a playground and battlefield for soilborne pathogens and beneficial microorganisms. *Plant and Soil* 321: 341-361. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9568-6>
- Rengifo-Guzmán HG, Leguizamón-Caydedo JE, Riaño-Herrera NM (2002). Algunos aspectos biológicos de *Cercospora coffeicola*. *Cenicafé* 53(3): 169-177.
- Rivillas-Osorio CA, Serna-Giraldo CA, Cristancho-Ardilla MA, Gaitán-Bustamante AL (2011). La roya del café en Colombia. Impacto, manejo y costos de control. *Boletín Técnico Cenicafé* 36: 53 pp.
- Rivillas-Osorio CA, Castro-Toro AM (2011). Ojo de Gallo o Gota del Café (*Omphalia flavida*). *Boletín Técnico Cenicafé* 37: 25 pp.
- Romero-Cortés T, López-Pérez PA, Ramírez-Lepe M, Cuervo-Parra JA (2015). Modelado cinético del micoparasitismo por *Trichoderma harzianum* contra *Cladosporium cladosporioides* aislado de frutos de cacao (*Theobroma cacao*). *Chilean Journal Agricultural Animal Sciences* 31(3): 32-45. <http://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902016000100004>
- Salas JA (1970). Studies on the production of the perfect stage of *Mycena citricolor* (Bert & Curt) Ph.D. Thesis. University of California, Berkeley. 117 p.

- Sánchez-García BM, Espinosa-Huerta E, Villordo-Pineda E, Rodríguez-Guerra R, Mora-Avilés MA (2017). Identificación molecular y evaluación antagónica *in vitro* de cepas nativas de *Trichoderma* spp. sobre hongos fitopatógenos en raíz en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. Montcalm. *Agrociencia* 51(1): 63-79.
- Scharf DH, Heinekamp T, Brakhage AA (2014). Human and plant fungal pathogens: the role of secondary metabolites. *PLoS Pathogens* 10(1): e1003859. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.ppat.1003859>
- SENASICA (2014). Ojo de gallo *Mycena citricolor* (Berkeley & Curtis). Ficha Técnica (49) Dirección General de Sanidad Vegetal. 16 p.
- SENASICA (2018). Fitosanidad de cafeto: Situación epidemiológica de la Roya del Cafeto y otros riesgos Fitosanitarios asociados al cultivo del Cafeto en diez estados productores. Boletín epidemiológico No. 63. SAGARPA-SENASICA-DGSV México. 5 pp.
- Shafi J, Tian H, Ji M (2017). *Bacillus* species as versatile weapons for plant pathogens: a review. *Biotechnology and Biotechnological Equipment* 31: 446-459. <http://dx.doi.org/10.1080/13102818.2017.1286950>
- Shiomi HF, Silva HSA, de Melo IS, Nunes FV, Bettiol W (2006). Bioprospecting endophytic bacteria for biological control of coffee leaf rust. *Scientia Agricola* 63(1): 32-39. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162006000100006>
- Silva HSA, Tozzi JP, Terrasan CRF, Bettiol W (2012). Endophytic microorganism 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>
- Sirinunta A, Akarapisarn A (2015). Screening of antagonistic bacteria for controlling *Cercospora coffeicola* in Arabica coffee. *Journal of Agricultural Technology* 11(5): 1209-1218.
- Soto F, Tramón C, Aqueveque P, Bruijn J (2018). Microorganismos antagonistas que inhiben el desarrollo de patógenos en post-cosecha de limones (*Citrus limon* L.). *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences* 34(2): 173-184. <https://doi.org/10.4067/S0719-38902018005000406>
- Srimai K, Akarapisarn A (2014). *Bacillus subtilis* LBF02 as biocontrol agent against leaf spot diseases caused by *Cercospora lactucae-sativae* in lettuce. *Journal of Agricultural Science* 6(3): 151-158. <https://doi.org/10.5539/jas.v6n3p151>
- Temis-Pérez AL, López-Malo Vigil A, Sosa-Morales ME (2011). Producción del café (*Coffea arabica* L.): cultivo, beneficio, plagas y enfermedades. *Temas selectos de Ingeniería de Alimentos* 5(2): 54-74.
- Thapa S, Sotang N, Limbu AK, Joshi A (2020). Impact of *Trichoderma* sp. in agriculture: A mini-review. *Journal Biology Today s World* 9(7): 227.
- Torres NE, Melchor-Martínez EM, Ochoa JS, Ramírez-Mendoza RA, Parra-Saldívar R, Iqbal HMN (2020). Impact of climate change and early development of coffee rust. An overview of control strategies to preserve organic cultivars in Mexico. *Science of The Total Environment* 738: 140225. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140225>
- Ulloa-Ogaz AL, Muñoz-Castellanos LN, Nevárez-Moorillón GV (2015). Biocontrol of phytopathogens: Antibiotic production as mechanism of control. En: *The Battle Against Microbial Pathogens: Basic Science, Technological Advances and Educational Programs* (Ed. Méndez-Vilas A), pp. 305-309. Formatex, Badajoz, España.
- Vargas E (1984). Interacción de tratamiento biológico y químico en el combate del ojo de gallo (*Mycena citricolor*) en el cafeto. *Agronomía Costarricense* 8(2): 91-97.
- Villamil JE, Viteri SE, Villegas WL (2015). Aplicación de antagonistas microbianos para el control biológico de *Moniliophthora roreri* Cif & Par en *Theobroma cacao* L. Bajo condiciones de campo. *Revista de la Facultad Nacional de Agronomía de Medellín* 68(1): 7441-7450. <http://dx.doi.org/10.15446/rfnam.v68n1.47830>
- Villarreal-Delgado MF, Villa-Rodríguez ED, Cirachávez LA, Estrada-Alvarado MI, Parra-Cota FI, Santos-Villalobos S (2018). El género *Bacillus* como agente de control biológico y sus implicaciones en la bioseguridad agrícola. *Revista*

- Mexicana de Fitopatología 36(1): 95-130. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1706-5>
- Virginio FE, Astorga DC (2015). Prevención y control de la roya del café. Manual de buenas prácticas para técnicos y facilitadores. Manual técnico No. 131. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 96 pp.
- Yadav R, Karamanoli K, Vokou D (2010). Estimating bacterial population on the phyllosphere by serial dilution plating and leaf imprint methods. *Ecoprint* 17: 47-52. <https://doi.org/10.3126/eco.v17i0.4105>
- (Aceptado para publicación el 5 de diciembre de 2020)