

ESTRATEGIAS PARA EL CONTROL DEL HONGO FITOPATÓGENO *FUSARIUM* EN EL SECTOR AGRÍCOLA: DEL CONTROL QUÍMICO AL CONTROL BIOLÓGICO

Rosina Cabrera^{1,3}, Sharon Palafox-Félix^{2,3}, Ana Isabel Valenzuela-Quintanar³

¹CONACyT-Centro de Investigación y Desarrollo en Agrobiotecnología Alimentaria. Consorcio CIAD-CIATEJ. Pachuca Ciudad del Conocimiento y la Cultura, Blvd. Circuito La Concepción 3, CP 42162 San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México

²Centro de Investigación y Desarrollo en Agrobiotecnología Alimentaria. Consorcio CIAD-CIATEJ. Pachuca Ciudad del Conocimiento y la Cultura, Blvd. Circuito La Concepción 3, CP 42162 San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México

³Coordinación de Ciencia de los Alimentos, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C., Apartado Postal 1735, CP 83304 Hermosillo, Sonora, México

E-mail: rosina.cabrera@ciad.mx

RESUMEN

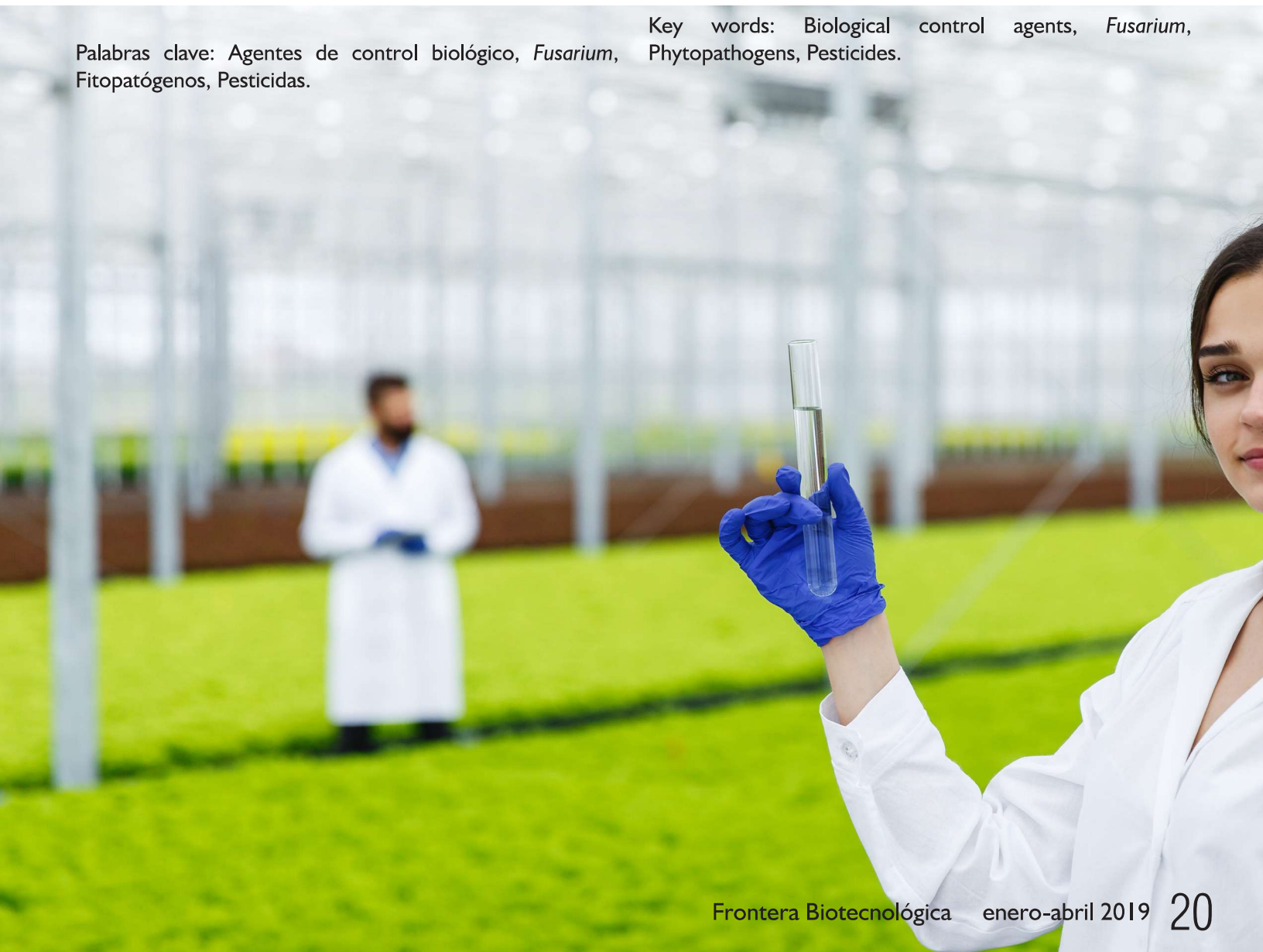
El cambio climático ha contribuido a la proliferación de plagas y enfermedades, las cuales repercuten en pérdidas económicas cercanas al 50% en países subdesarrollados como México. Las enfermedades causadas por hongos, principalmente de *Fusarium* spp. dañan raíz, vástago, hojas y fruto, produciendo y acumulando micotoxinas que afectan a granos y hortalizas de importancia económica, y generando problemas de salud en los consumidores. Para contrarrestar esta problemática, se han utilizado compuestos orgánicos (fungicidas), que por su alta aplicación generan problemas de contaminación medioambiental. El utilizar microorganismos, como agentes de control de plagas y enfermedades constituye una alternativa eficiente y ecológica para desarrollar una agricultura sustentable. El uso de microorganismos como *Trichoderma* spp. y *Bacillus* spp., pueden ser excelente alternativa para lograr estos objetivos. Asimismo, es importante el estudio de las interacciones establecidas entre los organismos patógenos y el medio ambiente para generar estrategias que permitan un combate de plagas más eficiente.

Palabras clave: Agentes de control biológico, *Fusarium*, Fitopatógenos, Pesticidas.

Abstract

Climate change has contributed to the proliferation of pests and diseases, which have an impact on economic losses close to 50% in underdeveloped countries such as Mexico. The diseases caused by fungi, mainly *Fusarium* spp. promote damage in root, stem, leaves and fruits, producing and accumulating mycotoxins that affect grains and vegetables of economic importance. Furthermore, generating health problems in consumers. To counteract these problem, organic compounds (fungicides) have been used, which due to their high application generate problems of environmental contamination. The use of microorganisms, as agents to control pests and diseases is an efficient and ecological alternative to develop a sustainable agriculture. The use of microorganisms such as *Trichoderma* spp. and *Bacillus* spp., can be an excellent alternative to achieve these objectives. Likewise, it is important to study the interactions established between pathogenic organisms and the environment in order to generate strategies that allow a more efficient pest control.

Key words: Biological control agents, *Fusarium*, Phytopathogens, Pesticides.



I. INTRODUCCIÓN

El calentamiento global del planeta o “cambio climático”, ha traído consigo efectos de gran impacto en el sector agrícola, como la proliferación de plagas y la transmisión de vectores de enfermedades nuevas y emergentes. Las enfermedades de las plantas causan considerables pérdidas en la producción agrícola y en el almacenamiento de los productos. En países desarrollados, se estima que hasta el 25% de dichas pérdidas son consecuencia de las enfermedades de las plantas, mientras que, en países subdesarrollados, las pérdidas pueden ser de hasta 50% (Gohel, et. al, 2006). En este contexto, uno de los principales problemas actuales que enfrentan los productores en el campo, es la necesidad de aumentar sus rendimientos, de tal manera que puedan ser competitivos en el mercado.

Las enfermedades causadas por hongos, han sido uno de los principales problemas agrícolas, sobre todo en regiones subtropicales y tropicales. *Fusarium* spp. representan una de las principales comunidades de hongos fitopatógenos que afectan a los cultivos a nivel mundial. Este hongo puede ocasionar enfermedades en raíz, vástago, hojas y fruto, provocando enormes pérdidas económicas. Además, *Fusarium* produce y acumula micotoxinas directamente sobre los granos, lo cual afecta la calidad del producto y puede constituir un problema relevante de salud para humanos y el ganado (Turkington, et al. 2016).

Durante décadas, se han utilizado compuestos orgánicos para el control de plagas. A pesar de que estos han mostrado un impacto favorable en el combate de plagas, su alta tasa de aplicación ha ocasionado problemas medioambientales, pues algunos de ellos presentan falta de selectividad y una alta toxicidad (Lucas, et. al, 2015). La utilización de microorganismos para el control de enfermedades de las plantas constituye una alternativa eficiente y ecológica que contribuye al desarrollo de una agricultura sustentable, ya que disminuye los efectos inherentes al uso de plaguicidas y productos químicos que ocasionan la contaminación de los suelos y agua. Con base en lo anterior, el objetivo de la presente revisión, es comunicar las investigaciones realizadas sobre la biología y patogenicidad del hongo fitopatógeno *Fusarium*, las estrategias que han sido utilizadas para su control en campo, así como los retos actuales para el manejo ecológico de los cultivos.

I. 2. HONGOS FITOPATÓGENOS DE IMPORTANCIA AGRÍCOLA

Las enfermedades de las plantas causan reducciones significativas en la productividad agrícola a nivel mundial. Asimismo, los síntomas de las enfermedades tienen efectos perjudiciales en el crecimiento y desarrollo de las plantas de cultivo, limitando los rendimientos y haciendo que los productos agrícolas no sean adecuados para el consumo. Las plantas pueden hospedar diferentes tipos de parásitos como hongos, bacterias y virus. Específicamente, los hongos patógenos de plantas, denominados fitopatógenos, son los principales agentes responsables de las enfermedades en los cultivos agrícolas, debido a que ecológicamente han desarrollado una variedad de estrategias para colonizar a sus hospederos. Durante el proceso de co-evolución hongo-hospedero se han establecido interacciones entre la virulencia del patógeno y la resistencia del huésped, desarrollándose mecanismos de infección y defensa muy especializados (Perfect y Green, 2001).

Se ha reportado que, para una invasión exitosa de los órganos de las plantas, el desarrollo de los hongos fitopatógenos está estrechamente regulado por la formación de estructuras especializadas de infección. Además, para la colonización, los patógenos despliegan un conjunto de factores de virulencia. Con base en esto y de acuerdo a sus ciclos de vida, los hongos fitopatógenos pueden clasificarse como necrótrofos, biótrofos y hemibiótrofos (Doehlemann, et. al, 2016). Los hongos necrótrofos son aquellos que secretan toxinas y enzimas que causan la muerte de la célula huésped de la que toman sus nutrientes. Dicha estrategia limita la capacidad de la planta para establecer una respuesta de defensa, como la producción de moléculas antifúngicas (Mayer, et. al, 2001). Por su parte, los hongos biótrofos establecen una estrecha asociación con el huésped mediante el desarrollo de hifas especializadas para la infección, llamadas haustorios, los cuales penetran la célula vegetal viva, de la que obtienen sus nutrientes. Durante este proceso, los hongos biótrofos secretan moléculas efectoras que suprimen a la planta y manipulan su metabolismo a favor del patógeno. De esta forma, el hongo puede colonizar y obtener sus nutrientes causando la muerte del huésped (Koeck, et. al, 2011). Por último, los hongos hemibiótrofos combinan las estrategias de necrotrofismo y biotrofismo. En la fase biotrófica inicial el sistema inmune y la muerte celular del huésped es suprimido, lo que permite la invasión de las hifas a lo largo del tejido infectado de la planta. Esta etapa es seguida por una fase necrotrofica durante la cual el patógeno secreta toxinas e induce la muerte celular del huésped (Perfect y Green, 2001; Koeck, et. al, 2011).

Actualmente, a nivel mundial se han reportado más de 8 000 especies de hongos que pueden causar enfermedades en plantas (Rodríguez-Guzmán, 2001). Los 10 principales agentes de hongos fitopatógenos son, en orden de clasificación: (1) *Magnaporthe oryzae*; (2) *Botrytis cinerea*; (3) *Puccinia* spp.; (4) *Fusarium graminearum*; (5) *Fusarium oxysporum*; (6) *Blumeria graminis*; (7) *Mycosphaerella graminicola*; (8) *Colletotrichum* spp.; (9) *Ustilago maydis*; (10) *Melampsora lini* (Dean, et. al, 2012). De estos, *Fusarium* es de gran importancia en agricultura, ya que las especies del género causan pudrición en la raíz de diversos cultivos de importancia económica, tales como, maíz, tomate, garbanzo, calabaza, agave, trigo y soya. Se ha descrito, que generalmente, son más de una, las cepas de *Fusarium* que se encuentran infectando a una misma planta (Walder, et. al, 2019), sugiriendo que la pudrición de la raíz es ocasionada por consorcios de diferentes especies de *Fusarium*.

2.1 Biología y patogenicidad del género *Fusarium*

El género *Fusarium*, descrito por primera vez en 1809 por Link, alberga diversas especies de hongos fitopatógenos y es considerado cosmopolita con especies que habitan en el suelo, aire y agua. La taxonomía de este género resulta compleja y ha sufrido diversos cambios desde su creación, pero aún se utiliza un sistema de clasificación basado principalmente en las características morfológicas de las colonias y las esporas del hongo (Figura 1). Además de la clasificación taxonómica, existen herramientas moleculares que permiten hacer una identificación más certera de las especies del género *Fusarium*, tales como, la secuenciación de marcadores moleculares como el gen 5.8S ARN ribosomal. Hasta el momento se han reconocido entre 9 y 78 especies del género, lo que muestra su complejidad taxonómica (Arbeláez, 2000).

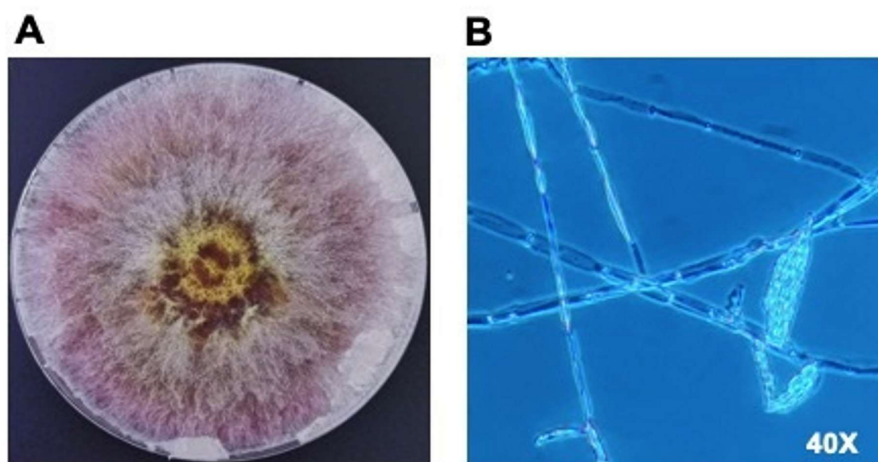


Figura 2. Morfología macroscópica y microscopía de *Fusarium* sp.
A Crecimiento de colonias en agar papa dextrosa. **B** Macroconidios.

Las enfermedades en las plantas causadas por *Fusarium* consisten en marchitamientos vasculares, manchas y añublos de las hojas, pudrición de raíces y de tallos, pudrición de frutos, granos y semillas (Arbeláez, 2000). Este hongo se encuentra naturalmente en el suelo y en ocasiones puede estar asociado a las pudriciones de raíz y tallos de una diversidad de plantas. Dentro de las especies del género que causan importantes problemas en cultivos agrícolas se encuentran *F. oxysporum* y *F. graminearum*.

Fusarium oxysporum (Schlecht) causa marchitamiento vascular en cultivos de algodón, repollo, cebolla, melón, tomate y sandía (Dita, et. al, 2018). El ciclo de vida de *F. oxysporum* inicia con una fase saprófita, cuando las clamidosporas, que se encuentran en los residuos de tejido vegetal en descomposición, germinan estimuladas por los exudados que liberan las raíces extendidas de otras plantas. Después, las hifas penetran las células epidérmicas de las raíces y, el micelio del hongo invade el sistema vascular en la planta. En etapas avanzadas, el hongo crece fuera del sistema vascular hacia células parenquimatosas adyacentes, produciendo conidios y clamidosporas. El patógeno sobrevive en restos de la planta infectada en el suelo como micelio y en todas sus formas de esporas (Dita, et. al, 2018).

Por otra parte, *Fusarium graminearum* (Schwabe) es un fitopatógeno en cereales como trigo, cebada y triticale, arroz, avena, frijol y maíz. Es importante destacar que este hongo presenta dos ciclos de vida: sexual y asexual. En el trigo, *F. graminearum* es el principal agente causal de la fusariosis de la espiga. El hongo puede desarrollarse saprófitamente sobre los residuos de plantas infectadas que permanecen en el suelo después de la cosecha. Sobre éstos, *F. graminearum* produce macroconidios (asexual) que son diseminados principalmente por aspersión en episodios de

lluvia. Cuando se presentan condiciones de temperaturas cálidas y alta humedad, el hongo forma peritecios que contienen ascosporas (*Gibberella zeae* es el estado sexual de *F. graminearum*) en su interior. Las ascosporas son expulsadas de los peritecios y son diseminadas por el aire. Las macroconidios y las ascosporas se depositan sobre las espigas florecientes del trigo e ingresan a la planta a través de las aberturas naturales, como los estomas, donde germinan e inician el proceso de infección. Las afectaciones en las plantas incluyen la destrucción de flores, producción de granos enfermos, arrugados y de menor tamaño. Además, los cereales pueden almacenar

micotoxinas producidas por el hongo, causando problemas de postcosecha (Trail, 2009; Turkington, et al. 2016).

III. ESTRATEGIAS PARA EL CONTROL DE HONGOS FITOPATÓGENOS

3.1 Control químico

El control químico, a través del uso de fungicidas, ha sido considerado uno de los principales métodos de control de enfermedades ocasionadas por hongos en el sector agrícola. Los cultivos fueron protegidos con éxito, en un principio, con aplicaciones de sulfato de cobre y azufre. Actualmente, el número de principios activos disponibles se ha incrementado enormemente, entre los que se destacan los ftalimidazoles o los ditiocarbamatos de generación intermedia y caracterizados por tener múltiples sitios de acción. En los últimos años el uso intensivo, y en ocasiones desmedido, de los compuestos fungicidas ha generado diversas controversias, debido a los efectos adversos que se ha demostrado pueden causar a la salud humana y al medio ambiente (Tabla 1). Asimismo, si no se respetan las dosis, intervalos de seguridad y el uso de productos

aprobados, estos productos químicos se pueden acumular en los alimentos, suelos y aguas, lo cual ocurre con gran frecuencia. Es importante destacar que la aplicación de fungicidas provoca una disminución de las poblaciones de microorganismos antagónicos naturales presentes en el suelo, ocasionando una disminución de la diversidad microbiana y favoreciendo la persistencia de organismos patógenos que afectan a los cultivos (Laatikainen and Heinonen-Tanski, 2002). Por tanto, debido a la persistencia de especies de hongos fitopatógenos como *Phyium*, *Phytophthora*, *Botrytis*, *Sclerotinia*, *Sclerotium*, *Rhizoctonia solani* y *Fusarium*, hongos que han aumentado persistencia durante los últimos años, aunado a los cambios que se han presentado en las prácticas agrícolas, y al interés mostrado por la población en general, se debe realizar una búsqueda constante para de estrategias sustentables que permitan controlar plagas y enfermedades (Benítez, et. al, 2004; Lucas, et. al, 2015; Puente, et. al, 2005).

Tabla 1. Fungicidas químicos utilizados para el control de hongos fitopatógenos en el sector agrícola.

COMPUESTO ACTIVO FUNGICIDA	TIPO	CUANDO APLICAR	MODO DE ACCIÓN	EFEECTO EN SALUD Y MEDIO AMBIENTE
Azufrados: Polisulfuro de calcio	Contacto	Preventiva en períodos de alto riesgo de la enfermedad.	Detiene la germinación de esporas de los hongos.	Moderadamente dañino Clase II Perjudicial si es ingerido y nocivo en contacto con la piel.
Cúpricos: Oxicloruro de cobre, hidróxido de cúprico	Contacto	Preventiva en períodos de alto riesgo de la enfermedad.	Afecta procesos en el desarrollo del hongo y detiene la germinación de esporas.	Grupo 1 (toxicidad aguda) Mortal si se inhala. Grupo 3 (toxicidad ambiental) Persistente en suelo, agua y sedimento; muy tóxico para organismos.
Benzimidazol: Tiabendazol Fenilpirol: Fludioxonil Estrobilurina: Azoxistrobina Fenilamidazoles: Metalaxil-M	Sistémico y/o contacto	En períodos de alto riesgo de la enfermedad; cuando sea probable la infección y que los síntomas aun no sean visibles.	De amplio espectro para el control de enfermedades que afectan al cultivo durante la siembra y almacenamiento.	Tiabendazol: Ligeramente peligroso Clase III. Puede ser perjudicial si se ingiere y/o en contacto con la piel. Fludioxonil y azoxitrobina: No representan problema en uso normal. Metalaxil-M: Moderadamente dañino Clase II. Perjudicial si es ingerido y nocivo en contacto con la piel.
Triazol: Tebuconazole	Sistémico	En períodos de alto riesgo de la enfermedad; cuando sea probable la infección, o bien, cuando se identifiquen los primeros síntomas de la infección. Es preventivo, curativo y erradicante.	Evita la germinación de las esporas, detiene el desarrollo temprano del hongo, evita la propagación de la enfermedad, afecta la síntesis del ergosterol e impide la formación de la pared celular fúngica.	Grupo 2 (Efectos a largo plazo) Probable carcinógeno-EPA.
Triazol: Propiconazol	Sistémico	En períodos de alto riesgo de la enfermedad; cuando sea probable la infección y sin síntomas visibles. Es preventivo, curativo y erradicante.	Inhibe la síntesis del ergosterol (componentes de la célula) perturbando las funciones de las células, que afectan el crecimiento del hongo hasta su muerte.	Moderadamente dañino Clase II Perjudicial si es ingerido y nocivo en contacto con la piel.
Ditiocarbamatos: Mancozeb	Contacto	En períodos de alto riesgo de la enfermedad. Es preventivo y curativo.	Es de amplio espectro inhibidor de múltiples sitios, afecta las membranas de las células fúngicas.	Grupo 2 (Efectos a largo plazo) probable carcinógeno-EPA y perturbador endócrino.
Dicarboxamidazoles: Procimidone	Sistémico	En períodos de alto riesgo de la enfermedad. Es preventivo y curativo.	Afecta la división celular, inhibe la germinación de esporas y bloquea el desarrollo del micelio del hongo.	Grupo 2 (Efectos a largo plazo) probable carcinógeno-EPA y perturbador endócrino.
Estrobilurinas: Azoxitrobin	Sistémico	Preventivo y curativo. En períodos de alto riesgo de la enfermedad.	Inhibe la germinación de esporas, impide el crecimiento micelial e inhibe la síntesis del ATP.	No representan problema en uso normal.

Referencias: World Health Organization, 2010; Pesticide Action Networks International, 2016.

3.2 Control biológico

La aplicación de fungicidas y productos químicos puede controlar enfermedades en los cultivos, sin embargo, su costo y las afectaciones al medio ambiente ha llevado a buscar métodos alternativos, incluyendo el uso de microorganismos (Dhanasekaran, et. al, 2012). El control biológico ha surgido como una alternativa al control químico y se define como el uso de microorganismos o sus metabolitos, antagónicos naturales de una plaga o patógeno, con el fin de reducir o eliminar los efectos nocivos sobre las plantas. A las bacterias que reducen la incidencia o gravedad de las enfermedades en plantas se les llama agentes de control biológico, mientras que aquellas que exhiben actividad antagónica hacia un patógeno se definen como antagonistas (Beneduzi, et. al, 2012). De hecho, la razón principal por la que en ocasiones los cultivos no son destruidos completamente, una vez que son atacados por plagas y enfermedades, es precisamente por la presencia natural de poblaciones con actividad antagónica contra los agentes fitopatógenos (Serrano-Carreón y Galindo-Fentanes, 2007).

Los mecanismos generales de control biológico pueden definirse como directos o indirectos del agente de control biológico sobre el fitopatógeno. Los mecanismos directos incluyen competencia por nutrientes y espacio, producción de antibióticos y enzimas líticas, inactivación de las enzimas del patógeno y el parasitismo. Mientras que, los mecanismos indirectos corresponden a aquellos que producen cambios morfológicos y bioquímicos en la planta huésped, tales como, tolerancia al estrés, solubilización de nutrientes inorgánicos y la resistencia inducida. Los principales agentes de control biológico utilizados contra *Fusarium* corresponden al hongo *Trichoderma* y a algunas especies del género *Bacillus*. A continuación, se describen los mecanismos que utilizan estas especies para combatir al fitopatógeno.

3.2.1 *Trichoderma* spp.

Trichoderma es conocido ampliamente como agente de control biológico de diversos fitopatógenos, entre ellos *Fusarium* (Luongo et al. 2005). Se han descrito tres tipos de interacción entre ambos hongos: competencia, microparasitismo y antibiosis (Figura 2). El mecanismo de competencia de *Trichoderma* es determinante para evitar que la raíz de la planta sea colonizada por el hongo fitopatógeno, favoreciendo así su propia colonización en la zona radicular y proporcionándole a la planta la ventaja de desarrollar mayor tolerancia al estrés hídrico mediante la solubilización de minerales como fósforo y zinc. El microparasitismo, por su parte, es la principal característica de todas las especies de *Trichoderma*,

y es definido como una simbiosis antagónica entre microorganismos, que es determinada por la producción de enzimas extracelulares como quitinasas y celulasas; las cuales, degradan las paredes celulares del fitopatógeno (Carsolio, et. al, 1999). El mecanismo de microparasitismo de *Trichoderma* inicia con la detección de señales químicas del patógeno, extendiendo las hifas hacia éste. Posteriormente, el hongo se adhiere a las hifas del patógeno y se enrolla. En etapas avanzadas, *Trichoderma* degrada las paredes celulares del huésped, lo que conlleva al debilitamiento del hongo fitopatógeno (Steyaert, et. al, 2003). Por lo que respecta al mecanismo de antibiosis, *Trichoderma* es capaz de sintetizar sustancias antibióticas que actúan en el control de los fitopatógenos; este género produce más de 120 metabolitos secundarios, incluidos moléculas antifúngicas (Popiel, et. al, 2008; Woo, et. al, 2006).

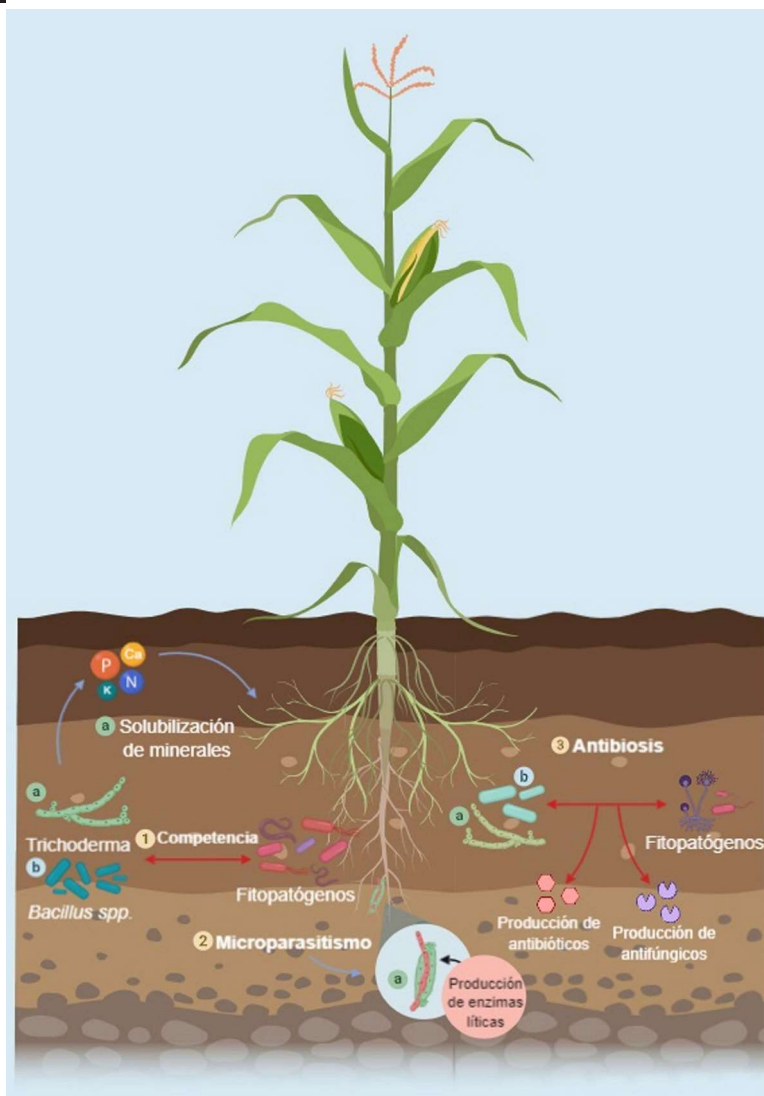


Figura 2. Mecanismos de control biológico desarrollados por *Trichoderma* spp. y *Bacillus* spp. en un contexto de la ecología microbiana en el suelo y la planta huésped.

3.2.1 *Bacillus* spp.

Existen pocas especies bacterianas que han sido descritas como antagonistas de *Fusarium* y capaces de reducir su población (Gardener, 2004; Popiel, et. al, 2008). Dentro de éstas, se han definido a los géneros *Bacillus* y *Paenibacillus* como grupos de bacterias capaces de promover la salud de los cultivos suprimiendo fitopatógenos y plagas; algunas especies son: *B. amyloliquefaciens*, *B. cereus*, *B. licheniformis*, *B. megaterium*, *B. mycoides* y *B. pumilus*. Los mecanismos de control biológico utilizados, por estas especies, incluyen el desarrollo de competencia por alimento y espacio, estimulación de la planta huésped mediante la inducción de tolerancia o resistencia, la producción de compuestos o enzimas antifúngicas, o bien, antibiosis (Figura 2). Siendo este último, un mecanismo altamente efectivo para la prevención y control de patógenos en la rizosfera (Matar, et. al, 2009;). Algunas bacterias también pueden estimular las defensas de la planta antes de que la infección suceda, facilitando la absorción de nutrientes, fijando directamente el nitrógeno y promoviendo la simbiosis de la rizosfera y micorrizas (Gardener, 2004). Debido a que las bacterias del género *Bacillus* habitan de manera natural en el suelo, como estrategias de control biológico se recomienda el uso de aislados bacterianos obtenidos directamente de los nichos donde habita el fitopatógeno que se desea controlar. De esta manera, se pretende incrementar las poblaciones del microorganismo benéfico y controlar más efectivamente al agente fitopatógeno mediante mecanismos de antagonismo.

IV. RETOS ACTUALES EN AGRICULTURA PARA UN MANEJO ECOLÓGICO DE LOS CULTIVOS

La ecología microbiana estudia las interrelaciones entre los microorganismos y el ambiente, así como el comportamiento de éstos en su entorno natural (Frioni, 2005). En el suelo, los microorganismos son un componente fundamental, ya que desempeñan actividades importantes en el funcionamiento del ecosistema como el control de las reacciones del ciclo de nutrientes esenciales para mantener una fertilidad, contribuyendo a su génesis y mantenimiento. En un sistema ecológico en equilibrio, los microorganismos poseen capacidades para colonizar un nicho y establecerse, asimismo, interaccionan entre sí para catalizar procesos bioquímicos. Sin embargo, los agentes microbianos son susceptibles a cambios en el entorno,

por ejemplo, la aplicación de pesticidas en las prácticas agrícolas convencionales ha deteriorado la productividad y calidad de los suelos de cultivo, provocando la pérdida de comunidades beneficiosas y el deterioro del funcionamiento del ecosistema (Garbeva, et. al, 2004).

En este contexto, los principios de la ecología microbiana son fundamentales para el desarrollo de estrategias que permitan el control de plagas y enfermedades de una manera sustentable. Los principales retos actuales para el desarrollo de dichas estrategias son: i) la generación de conocimiento que permita entender las interacciones que establecen el o los agentes fitopatógenos con las plantas de cultivo y con las comunidades de microorganismos con los que co-habitan en nichos naturales, como el suelo; ii) la identificación y caracterización de nuevas cepas de hongos fitopatógenos, así como el entendimiento de sus mecanismos de patogénesis; y iii) la búsqueda de nuevos agentes biológicos con capacidad antagonista contra nuevas cepas de agentes fitopatógenos (Figura 3). Cabe destacar que, la importancia de la generación de estrategias de control biológico efectivas en campo, radica en el uso de microorganismos benéficos cuya aplicación mantenga el equilibrio microbiano del nicho donde serán aplicados. De esta manera, los agentes de control competirán con los agentes fitopatógenos causantes de las enfermedades en los cultivos, y las comunidades benéficas que co-habitan en el suelo podrán establecer interacciones benéficas con las plantas.

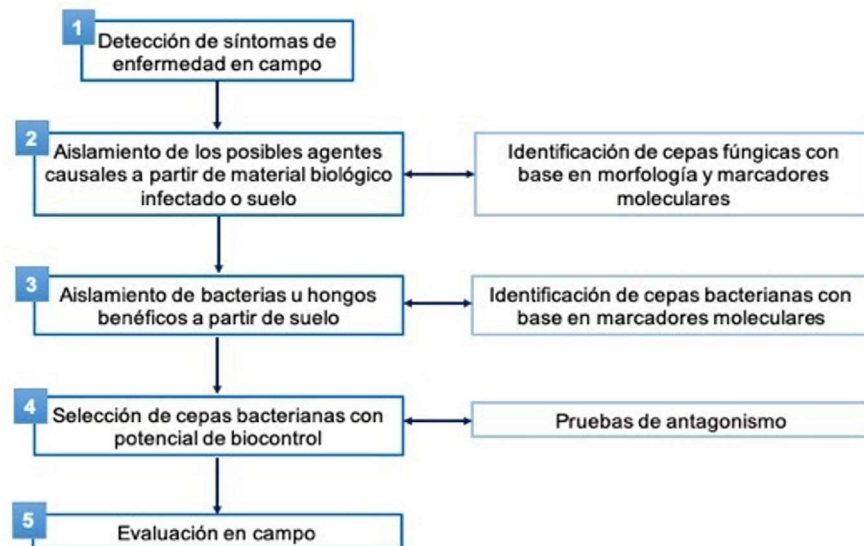


Figura 3. Estrategia para la investigación de nuevos agentes de control biológico que permitan el combate de plagas y enfermedades en cultivos agrícolas.

CONCLUSIONES

El control de enfermedades ocasionadas por hongos fitopatógenos ha dependido del uso de fungicidas. La aplicación de estos agentes ha representado un alto riesgo para la salud humana y el medio ambiente. En este contexto, en el sector agrícola ha surgido la necesidad del desarrollo y la implementación de estrategias sustentables que permitan el control de enfermedades en campo y, por ende, que contribuyan a mejorar los rendimientos agrícolas respetando el medio ambiente mediante la disminución o eliminación del uso de agentes químicos; surgiendo de esta manera el control biológico. Dicha estrategia ha demostrado tener buenos resultados en campo. Sin embargo, para enfrentar los nuevos retos que representa el combate de nuevas cepas de hongos fitopatógenos, es necesario la búsqueda de nuevos microorganismos antagónicos a partir del suelo, estudiar sus mecanismos de inhibición y establecer estrategias para su aplicación en campo.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) y al Centro de Investigación y Desarrollo en Agrobiotecnología Alimentaria (CIDEA) por la beca otorgada a la estudiante SPF (Proyecto FOMIX Hidalgo 2015-01-267837).

REFERENCIAS

- Arbeláez, G. 2000. Algunos aspectos de los hongos del género *Fusarium* y de la especie *Fusarium oxysporum*. Agronomía colombiana. 17:111.
- Beneduzi, A., Ambrosini, A., and Passaglia, L.M.P. 2012. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): Their potencial as antagonists and biocontrol agents. Genet Mol Biol. 35(4): 1044-1051.
- Benítez, T., Rincón, A.M., Limón, M.C., and Codón, A.C. 2004. Biocontrol mechanisms of *Trichoderma* strains. Int Microbiol. 7: 249–260.
- Carsolio, C., Benhamou, N., Haran, S., Cortés, C., Gutiérrez, A., Chet, I., and Herrera-Estrella, A. 1999. Role of the *Trichoderma harzianum* endochitinase gene, ech42, in mycoparasitism. Appl Environ Microbiol. 65(3): 929–935.
- Dhanasekaran, D., Thajuddin, N., and Pannersevlam, A. 2012. Applications of actinobacterial fungicides in agriculture and medicine in: Dhanasekaran, D. (Ed.) Fungicides for plant and animal diseases. Intech open. pp. 29-55.
- Dean, R., Van Kan, J.A.L., Pretorius, Z.A., Hammond-Kosack K.E., Di Pietro, A., Spanu, P.D., Rudd, J.J., Dickman, M., Kahmann, R., Ellis, J., and Foster, G.D. 2012. The top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. Mol Plant Pathol. 13(4): 414-430.
- Dita, M., Barquero, M., Heck, D., Mizubuti, E.S.G., and Staver, C.P. 2018. *Fusarium* wilt of banana: current knowledge on epidemiology and research needs toward sustainable disease management. Front Plant Sci. 9:1468.
- Doehlemann, G., Ökmen, B., Zhu, W., and Sharon, A. 2017. Plant pathogenic fungi. Microbiol Spectrum. 5(1): FUNK-0023-2016.
- Frioni, L. 2005. Microbiología: Básica, ambiental y agrícola. Facultad de Agronomía. Universidad de la República Uruguay.
- Gardener, B.B.M. 2004. Ecology of *Bacillus* and *Paenibacillus* sp in agricultural systems. Phytopathol. 94: 1252-1258.
- Garbeva, J.A., van Veen, J.D., and van Elsas. 2004. Microbial diversity in soil: Selection of microbial populations by plant and soil type and implications for disease suppressiveness. Annu Rev Phytopathol. 42:1, 243-270.
- Gohel, V., Singh, A., Vimal, M., Ashwini, P., and Chhatpar, H.S. 2006. Bioprospecting and antifungal potencial of chitinolytic microorganisms. Afr J Biotechnol. 5 (2): 54-72.
- Koeck, M., Hardham, A.R., and Doods, P.N. 2011. The role of effectors of biotrophic and hemibiotrophic fungi in infection. Cell Microbiol. 12(12): 1849-1857.
- Lucas, J.A., Hawkins, N.J., and Fraaije, B.A. 2015. The evolution of fungicide resistance. Adv Appl Microbiol. 90: 29-92.
- Luongo L., Galli, M., Corazza L., Meekees E., De Haas L., Van Der Plas C. L., and Köhl J. 2005. Potential of fungal antagonists for biocontrol of *Fusarium* sp. in wheat and maize through competition in crop debris. Biocontrol Sci Tech. 15: 229–242.
- Matar, S.M., El-Kazzaz, S.A., Wagih, E.E, El-Diwany, A.I., Moustafa, Abo-Zaid, G.A., Abd-El salam, H.E., Hafez, E.E. 2009. Antagonistic and Inhibitory Effect of *Bacillus subtilis* Against Certain Plant Pathogenic Fungi, I. Biotechnology. 8(1): 53-61.
- Mayer, A.M. Staples, R.C., and Gil-ad, N.L. 2001. Mechanisms of survival of necrotrophic fungal plant pathogens in host expressing the hypersensitive response. Phytochemistry. 58: 33-41.
- Pesticide Action Networks International. 2016. PAN International List of Highly Hazardous Pesticides. Hamburg, Germany. Available from: http://www.pan-germany.org/download/PAN_HHP_List_161212_F.pdf
- Parikh, L., Kodati, S., Eskelson, K.J., and Adesemoye, A.O. 2018. Identification and pathogenicity of *Fusarium* spp. In row crops in Nebraska. Crop Prot. 108:120-127.
- Perfect, S.E., and Green, J.R. 2001. Infection structures of biotrophic and hemibiotrophic fungal plant pathogens. Mol Plant Pathol. 2(2): 101-108.
- Popiel D., Kwaśna, H., Chełkowski, J., Stępień, Ł., Laskowska, M. 2008. Acta Mycol. 43 (1): 29-40.
- Puente, M., Campos, A., and León, A. 2005. Efecto fungicida o fungistático de un extracto vegetal sobre plantas susceptibles al hongo fitopatógeno del suelo *Sclerotium rolfsii* Sacc. en condiciones de cultivo protegido. Memorias XVII Congreso de la Asociación Latinoamericana de Malezas (ALAM). Varadero, Matanzas. pp. 637-643.
- Rodríguez-Guzmán, M.P. 2001. Biodiversidad de los hongos fitopatógenos del suelo de México. Acta Zoológica Mexicana (nueva serie). Número especial 1: 53-78.
- Serrano-Carreón, L., and Galindo-Fentanes, E. 2007. Control biológico de organismos fitopatógenos: un reto multidisciplinario. Comunicaciones libres. Ciencia. pp. 77-88.
- Steyaert, J.M., Ridgway, H.J., Elad, Y., and Stewart, A. 2003. Genetic basis of mycoparasitism: A mechanism of biological control by species of *Trichoderma*. New Zeal J Crop Hort. 4(31): 281-291.
- Trai, F. 2009. For blighted waves of grain: *Fusarium graminearum* in the postgenomics era. Plant Physiology. 149: 103-110.
- Turkington, T.K., Petran, A., Yonow, T., and Kriticos, D.J. 2016. *Fusarium graminearum*. Harvest Choice Pest Geography. St. Paul, MN: InStEPP-HarvestChoice.
- Walder, F., Schlaeppi, K., Wittwer, R., Held, A.Y., Vogelgsang, S., and van der Heijden, M.G.A. 2017. Community Profiling of *Fusarium* in Combination with Other Plant-Associated Fungi in Different Crop Species Using SMRT Sequencing. Front Plant Sci. 8:2019.
- World Health Organization. 2010. The WHO recommended classification of pesticides by hazard and guidelines to classification 2009, World Health Organization. Ginebra, Suiza. pp 1-81. Available from: https://www.who.int/ipcs/publications/pesticides_hazard_2009.pdf
- Woo S. L., Scala F, Ruocco M., Lorito M. 2006 The molecular biology of interactions between *Trichoderma* sp., phytopathogenic fungi and plants. Phytopathology 96: 181–185.