



Review [Revisión]

IMPACT AND CONTROL PROSPECTS OF THE *Fusarium* COMPLEX, ASSOCIATED TO WILT IN AGAVE AND OTHER CROPS †[IMPACTO Y PERSPECTIVAS DE CONTROL DEL COMPLEJO *Fusarium*, ASOCIADO A LA MARCHITEZ EN AGAVE Y OTROS CULTIVOS]

María del Carmen Corona-Rodríguez¹, Hilda Guadalupe García-Núñez¹, Amaury Martín Arzate-Fernández^{1*}, Tomás Héctor Norman-Mondragón¹ and Valentina Lamus-Molina²

¹ Laboratorio de Biología Molecular Vegetal del Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Fitomejoramiento (CIEAF), Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México-Campus Universitario "El Cerrillo". Carretera Toluca-Ixtlahuaca, km 11.5 entronque al Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, C. P. 50200, México. Email:

amaury1963@yahoo.com.mx

² Facultad de Ingeniería, Unidad Central del Valle del Cauca. Carretera 28ª. Kilómetro 1. Salida al Sur Tuluá, Ciudadela Universitaria, Tuluá, Colombia

*Corresponding author

SUMMARY

Background. The *Fusarium* complex is the causal agent of vascular wilt in agave that causes damage to the roots, stem/cone, and leaves. This affects the health of the agave, the yield and therefore the quality of drinks derived from this plant, such as pulque, mezcal and tequila, this prevents ensuring demand in the national and international market. Chemical control has been the most frequent method used to control this disease; however, it has shown a negative impact by generating resistance of the pathogen, damage to the environment and human health, which makes it necessary to search for sustainable and efficient strategies to control this disease. **Objective.** To carry out an exhaustive analysis of the reports related to the chemical, biological, ecological and phytosanitary methods used to control the *Fusarium* complex that causes wilting in agave and other crops and to verify the ecological and economic impact of its application. **Methodology.** A systematic bibliographic review was carried out, based on the PRISMA protocol (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses, for its acronym in English), the information search was carried out in the most prominent databases (Science Direct, Redalyc, Scielo, Scopus, Google scholar, Google scholar and Pubmed), using as keywords, *Fusarium* complex, vascular wilt, agave and control methods, considering a period of 30 years (from 1994 to 2024) as inclusion criteria, which allowed for a more perspective. extensive study on the impact of the different methods used to control vascular wilt in agave caused by the *Fusarium* complex. **Main findings.** The analysis of the information allowed us to identify the most used control methods for wilting in agave and other crops of agricultural importance, among which are: silica, ozone, essential oils, acid water, mycorrhizas, nanoparticles, salicylic acid, extracts vegetables, and biocontrol by antagonist agents (*Trichoderma* and *Bacillus*), where the latter appear reported in 33% of the documents reviewed. **Implications.** Inescapably, in studies on agave wilt caused by the *Fusarium* fungus, the possible action of a pathogenic complex formed by two or more species of this genus must be considered and for its control management, already proven strategies must be applied. **Conclusions.** The use of antagonist agents and plant extracts can be applied to manage wilt caused by the *Fusarium* complex in agave and other crops, with high control efficiency. Furthermore, these methods turn out to be an ecological, sustainable and effective strategy.

Key words: *Fusarium* complex; vascular wilt; Agave; control methods.

RESUMEN

Antecedentes. El complejo *Fusarium* es el agente causal de la marchitez vascular en agave que causa daño en raíz, tallo/piña y hojas. Esto repercute en la sanidad del agave, el rendimiento y por tanto en la calidad de bebidas derivadas

† Submitted April 11, 2024 – Accepted November 28, 2024. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5564>



de esta planta, tales como el pulque, mezcal y tequila, esto impide asegurar la demanda en el mercado nacional e internacional. El control químico ha sido el método más frecuente utilizado para el control de esta enfermedad, sin embargo, ha mostrado un impacto negativo al generar resistencia del patógeno, daños al ambiente y a la salud humana, lo cual hace necesaria la búsqueda de estrategias sustentables y eficientes para su control. **Objetivo.** Realizar análisis exhaustivo de los reportes relacionados con los métodos químicos, biológicos, ecológicos y fitosanitarios usados para el control del complejo *Fusarium*, causante de la marchitez en agave y otros cultivos, y constatar el impacto ecológico y económico de su aplicación. **Metodología.** Se realizó una revisión bibliográfica sistematizada, sobre los reportes de evaluación de la eficiencia de los métodos de utilizados para el control de la marchitez en agave y otros cultivos, causada por el complejo *Fusarium*; todo esto con base en el protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses, por sus siglas en inglés), la búsqueda de información se realizó en las plataformas de datos más destacadas (Science Direct, Redalyc, Scielo, Scopus, Google scholar, Google académico y Pubmed), utilizando como palabras clave, complejo *Fusarium*, marchitez vascular, agave y métodos de control, considerando como criterio de inclusión un periodo de 30 años (de 1994 a 2024), lo cual permitió tener una perspectiva más amplia sobre el impacto de los diferentes métodos empleados para el control de la marchitez vascular en agave causado por el complejo *Fusarium*. **Principales Hallazgos.** El análisis de la información permitió identificar los métodos de control más utilizados para la marchitez en agave y otros cultivos de importancia agrícola, dentro de los cuales se encuentran: sílice, ozono, aceites esenciales, agua ácida, micorrizas, nanopartículas, ácido salicílico, extractos vegetales, y el biocontrol por agentes antagonistas (*Trichoderma* y *Bacillus*), donde estos últimos aparecen reportados en un 33% de los documentos revisados. **Implicaciones.** Ineludiblemente, en los estudios sobre la marchitez del agave, causados por el hongo *Fusarium* se debe considerar la posible acción de un complejo patogénico formado por dos o más especies de este género y para su manejo de control aplicar estrategias ya probadas. **Conclusiones.** El uso de agentes antagonistas y extractos vegetales pueden aplicarse para el manejo de la marchitez causada por el complejo *Fusarium* en agave y otros cultivos, con una alta eficiencia de control, además de que estos métodos resultan ser una estrategia ecológica, sustentable y efectiva.

Palabras clave: Complejo *Fusarium*; marchitez vascular; *Agave*; métodos de control.

INTRODUCCIÓN

El origen del género *Agave* tiene aproximadamente 10 millones de años y su domesticación data de hace 10 mil años y es endémico de América. De las 211 especies de *Agave* que existen en este continente, el 75% (159) prosperan en México (García-Mendoza, 2018), considerado centro de origen, diversidad morfológica, filogenética y evolutiva de este género (García-Herrera *et al.*, 2010). En México, la distribución de esta planta va desde el norte hasta el sur de la República Mexicana, siendo el estado de Oaxaca la zona con mayor diversidad de agaves.

Actualmente, este género se investiga desde varios puntos de vista, estudios que abarcan el manejo agroecológico, bioquímico, fisiológico y especialmente en aplicaciones en biotecnología como su uso en biocombustibles, además de bebidas, alimentos, fibras y obtención de metabolitos secundarios con aplicaciones farmacéuticas (Naivy *et al.*, 2015). En el sector productivo y económico, la industria de bebidas es considerada la de mayor potencial para la producción de tequila, mezcal, pulque, bacanora y comiteco (Pérez-Hernández *et al.*, 2016), donde destaca la producción de los dos primeros, que representan el 18.6% de la producción total bruta, y en donde el tequila registró una participación de alrededor del 87% de la producción y el mezcal el 13 %. Según los censos económicos de

2014, por cada 100 pesos de bebidas alcohólicas que se produjeron, casi 20 pesos correspondieron al tequila y mezcal (INEGI-CAJ, 2019). López-Nava *et al.* (2014) reportaron que a nivel nacional existen 30,000 productores y 625 fábricas que produjeron 8 millones de litros de mezcal con un valor de 1,700 millones de pesos; esto demuestra el impacto económico de estas empresas. Es importante considerar que la planta de *Agave* es la materia prima para la producción de ambas bebidas y su explotación implica miles de toneladas. La calidad en la elaboración de estas bebidas exige cultivos saludables que requieren material vegetativo sano, como semillas, hijuelos y estolones de plantas madre que garanticen su certificación y exportación (CRM, 2020; CRT, 2020). El cultivo de agave es redituable y noble, sin embargo, no se escapa de la presencia de plagas y enfermedades que limitan su cultivo, tal es el caso de la marchitez vascular, enfermedad causada por el complejo *Fusarium*.

Hoy en día, es complicado controlar a *Fusarium* porque este hongo tiene una larga supervivencia en el suelo debido a sus estructuras de resistencia como las clamidosporas. Sin embargo, para el manejo de la marchitez del agave causada por este género, se han implementado diferentes medidas que van desde el marco legal, dispuestas en el Diario Oficial de la Federación en 2013, hasta otros métodos fitosanitarios de gran importancia y eficiencia, de ahí que, el objetivo

de esta revisión fue realizar un análisis exhaustivo sobre las publicaciones relacionadas con los métodos químicos, biológicos, ecológicos y fitosanitarios, enfatizando su uso para el control de esta enfermedad en el agave y en otros cultivos, así como revisar el impacto ecológico y económico de su aplicación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una revisión bibliográfica sistemática, de agosto 2023 a mayo 2024, con base en el protocolo de la declaración PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (Page *et al.*, 2021), por sus siglas en inglés), en las siguientes plataformas de datos como, Science Direct, Redalyc, Scielo, Scopus, Google scholar, Google académico y Pubmed, usando como criterio de inclusión documentos que se hayan publicado entre 1994 y 2024 (30 años). En la búsqueda de la información se utilizaron las siguientes palabras clave: complejo *Fusarium*, *Agave*, marchitez vascular y métodos de control y la combinación de las mismas como: agave + marchitez vascular, métodos de control + *Fusarium*, marchitez vascular+ *Fusarium*, agave+ marchitez vascular+ complejo *Fusarium*, control químico+ marchitez +agave, *Fusarium*+ cultivos, control biológico + marchitez vascular. Se consideraron documentos como artículos científicos, libros, boletines, gacetas, paginas gubernamentales y tesis doctorales. Para la búsqueda se consideró el idioma inglés como el español, sin embargo, el idioma español fue el que predominó en los resultados de búsqueda. De acuerdo con la información bibliográfica obtenida, esta se clasificó, analizó, discutió e integró en secciones como: taxonomía y caracterización fenotípica del género *Fusarium*, técnicas de cultivo y preservación de *Fusarium*, caracterización molecular del género *Fusarium*, enfermedades causadas por *Fusarium*, ciclo biológico de *Fusarium* spp. en agave, métodos de control y perspectivas de manejo de la marchitez vascular en agave. Con los datos registrados se realizaron imágenes, mapas, tablas y diagramas de análisis que se discutieron, lo cual permitió generar conclusiones obtenidas de esta revisión bibliográfica. Cabe mencionar que para nuestro estudio se encontraron un total de 138 referencias y después de aplicar los criterios de exclusión se trabajó con 117 referencias bibliográficas y fueron capturadas de acuerdo al formato MENDELEY.

RESULTADOS

La información recopilada de los documentos consultados permitió agruparlos en los siguientes subtemas: Taxonomía y caracterización fenotípica del género *Fusarium*, técnicas de cultivo y preservación de

Fusarium, caracterización molecular del género *Fusarium*, complejo *Fusarium*, enfermedades causadas por *Fusarium*, impacto socioeconómico de la marchitez vascular en *Agave* por el complejo *Fusarium* (F.o.), epidemiología de la marchitez vascular causada por los complejos de *Fusarium*, implicaciones de la marchitez vascular en *agave*, ciclo biológico de *Fusarium* spp. en *Agave*, métodos de control del complejo *Fusarium* y perspectivas de manejo de la marchitez vascular en *Agave*, control cultural, control químico, métodos alternativos para el control del complejo *Fusarium* que afecta al agave y otros cultivos agrícolas (sílice, ozono, aceites esenciales, agua ácida, micorrizas, nanopartículas, ácido salicílico, extractos vegetales, y el biocontrol por agentes antagonistas (*Trichoderma* y *Bacillus*)). Cada uno de estos subtemas tiene su propia particularidad que permitió generar tablas, figuras y gráficas para una mejor comprensión y síntesis de la información.

Taxonomía y caracterización fenotípica del género *Fusarium*

Después de una revisión histórica, se encontró que el origen de *Fusarium* data de hace 91.3 millones de años (Ma *et al.*, 2013), y actualmente tiene una distribución mundial; es un hongo cosmopolita capaz de habitar en el suelo, agua y aire (Arbeláez, 2000; Summerell *et al.*, 2003). Su identificación comenzó hace más de 100 años, desde entonces se han descrito alrededor de 70 especies de este género (Cardona-Piedrahíta y Castaño-Zapata, 2019). Se puede decir que, en los últimos años la mayoría de las especies del género *Fusarium* son de los hongos patógenos más incidentes y devastadores en el mundo, ya que representan un riesgo para la salud humana, los animales y además limitan la calidad de plantas de importancia agrícola, ornamental y forestal.

Los hongos del género *Fusarium* son filamentosos y a nivel taxonómico se ubican en la Phyla: Ascomycota, División: Deuteromycota, Clase: Sordariomycetes, Orden: Hypocreales y Familia: Hypocreaceae (Vega-Ramos *et al.*, 2013). Es importante destacar que, a lo largo de dos décadas, ha sido difícil incluir o excluir especies dentro de este género, ya que las claves taxonómicas basadas en caracteres morfométricos muestran que las especies de *Fusarium* son muy variables debido a sus características genéticas y a los cambios que el ambiente causa en la morfología de los cultivos. Sin embargo, existen características diagnósticas propias del género, por ejemplo, tienen estructuras de multiplicación tales como: micelio algodonoso hialino y septado, algunas cepas tienen una esporulación que va del color blanquecino, crema, rosa, violeta o morado según la especie (Cardona-Piedrahíta y Castaño-Zapata, 2019; López-Bautista *et*

al., 2020), tal y como se observa en la Figura 1A. Este micelio ramificado y tabicado contiene esporóforos en forma de fiálides que son estructuras laterales finas, cortas y simples en forma de botella, de donde emergen los microconidios formados por una o dos células, éstos son hialinos, elipsoidales a cilíndricos, rectos o curvados, miden entre 5 y 12 μm de largo por 2.5 a 3.5 μm de ancho. Los macroconidios que se forman en esporodoquios, tienen forma curva de medialuna y septados, con tres a cinco células, presentan una célula apical y pie, miden entre 20.3 y 27.0 μm de largo y 6.7 μm de ancho (Arberlález, 2000; Tapia y Amaro, 2014; López-Bautista *et al.*, 2020), Figura 1B. También presentan clamidosporas que miden de 5 a 15 μm de diámetro, pueden permanecer en el suelo hasta por 6 años, entre los 10 y 20 cm de profundidad. La identificación morfológica se ha realizado mediante claves taxonómicas entre las más utilizadas son las de Booth (1971) y Samson *et al.* (1995) además de las consideraciones recientes de Summerell *et al.* (2003). Por otra parte, la producción de pigmentos es importante en la identificación de hongos del género *Fusarium*, ya que se pueden difundir en el medio de cultivo y varían en color desde tonos rojizos, amarillos y azules, hasta violeta y negro, lo cual proporciona indicios visuales valiosos para la diferenciación de especies (Goertz *et al.*, 2010). La presencia y tipo de pigmentos pueden estar correlacionados con la capacidad de producción de micotoxinas como tricotecenos y fumonisinas que tienen implicaciones importantes en la agricultura y la salud pública por su toxicidad (Serrano y Castro, 2015; Logrieco *et al.*,

2002). Se ha encontrado, además, la presencia de antraquinonas (Duran *et al.*, 2002), las cuales pueden llegar a ser fitotóxicas, pero también poseen una amplia actividad biológica contra bacterias, hongos y levaduras (Medentsev y Akimenko, 1998).

Técnicas de cultivo y preservación de *Fusarium*

Los aislados de *Fusarium* se propagan *in vitro* en laboratorio, donde se busca la germinación de esporas. Los medios más utilizados para la identificación de especies de *Fusarium* son el agar de hoja de clavel, el agar de dextrosa de papa (PDA), el medio KCl y el agar de suelo. Adicionalmente, el MGA (Guayaba Agria) se encuentra dentro de los medios de cultivos selectivos más adecuados para el crecimiento de *Fusarium*, ya que conserva las características morfológicas (Bragulat *et al.*, 2004). Estos se preparan en condiciones asépticas en placas Petri o bien en tubos (según los requerimientos), el aislado se inocula y se incuba de 7-10 días a 25°C, obteniendo cultivos monospóricos libres de contaminación. En relación con la preservación, existen varias técnicas usadas para el cultivo de *Fusarium*, por ejemplo, la liofilización, congelación de suspensión de esporas a -70 °C en nitrógeno líquido, almacenamiento de esporas en papel filtro, silica gel a -20°C y muestras de suelo a 4 °C. La preservación es muy importante ya que el tener muestras secas para trabajar en estudios a futuro, es una gran ventaja, por este motivo los laboratorios optan por usar estas técnicas (Leslie y Summerell, 2006).

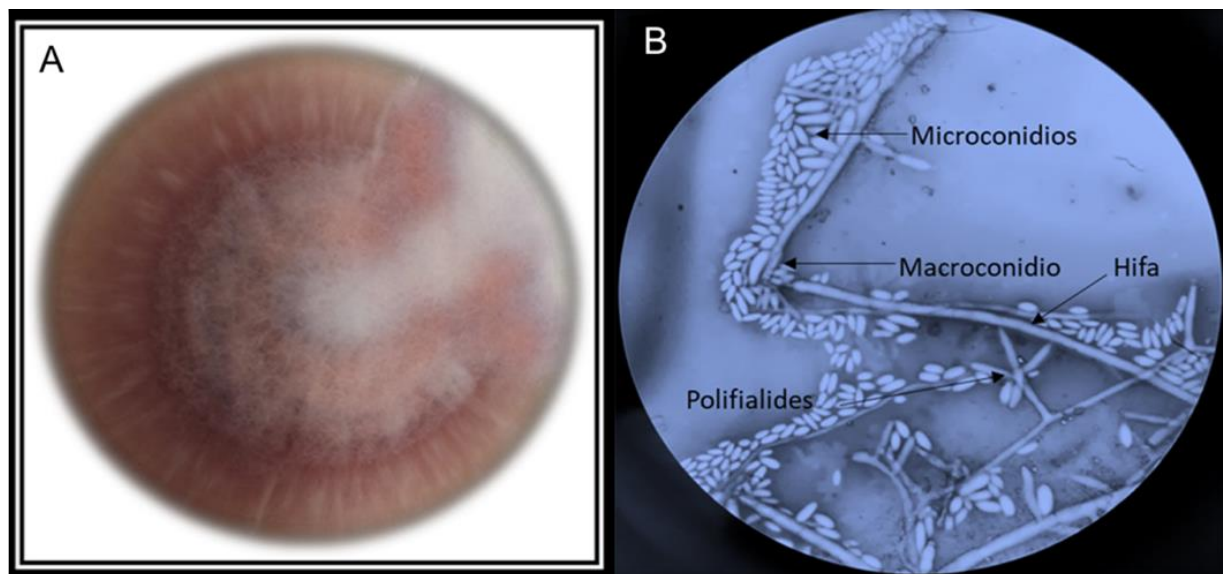


Figura 1. Características morfológicas de *Fusarium* sp. A) Micelio algodonoso en crecimiento *in vitro* a los 7 días en medio PDA, B) Estructuras microscópicas (100X).

Caracterización molecular del género *Fusarium*

Hoy en día es imprescindible realizar la caracterización molecular de especies de *Fusarium* para garantizar su correcta identificación, lo cual permite conocer la variabilidad genética de este género. Al respecto, a partir de los aislados de *Fusarium* se han caracterizado las diferentes especies que hoy se conocen. Esto ha sido posible mediante técnicas como la reacción en cadena de la polimerasa (PCR, por sus siglas en inglés), la reacción de patogenicidad en hospedantes diferenciales (Leyva *et al.*, 2003), la determinación de los grupos de compatibilidad vegetativa (VCGs) (Andrés *et al.*, 2001), así como las pautas de amplificación por técnicas moleculares que comparan secuencias de ADN, como el uso de RAPD (Polimorfismo de DNA amplificados), ITS (Espaciadores Internos Transcritos), RFLP (Polimorfismos de Longitud de Fragmentos de Restricción) e ISSR (Secuencias Simples Repetidas) (Da Silva *et al.*, 2010; Rangel-Castillo *et al.*, 2017). También se han tenido reportes del empleo de técnicas moleculares que comparan pequeñas secuencias de ADN de regiones que son altamente conservadas como la calmodulina, β tubulina y la histona H3. Asimismo, el gen TEF1- α , o factor de elongación de la traducción, que es una de las regiones más empleadas en la identificación molecular de hongos, entre los que se encuentra *Fusarium*, ya que muestra un alto nivel de polimorfismo entre especies estrechamente relacionadas (Henao-Henao *et al.*, 2018). Entre los iniciadores utilizados para estas técnicas están los OPAX 10, PAX12; OPBO3, OPB04; OPF05 (Silva *et al.*, 2010), Ef1 α y Ef2 (Wulff *et al.*, 2010; Henao *et al.*, 2018). Actualmente existen técnicas sofisticadas basadas en secuenciación de segunda generación para el estudio de la diversidad genética de *Fusarium* y de otros organismos, pero éstas tienen altos costos. El uso correcto de estas técnicas y los resultados rápidos, precisos, consistentes y confiables apoyan la identificación de las especies del género *Fusarium*, lo cual facilita la generación de información en los estudios de investigación, y el entendimiento de los aspectos epidemiológicos en las enfermedades que producen cada una de las especies (Chandra *et al.*, 2011)

Complejo *Fusarium*

Las especies de *Fusarium* pueden provocar graves daños en diversos cultivos agrícolas, por ello son consideradas como patógenas de un amplio rango de hospedantes. Después de minuciosas investigaciones se ha determinado que *Fusarium* ataca al cultivo mediante un conjunto de varias especies a lo que se le denomina “Complejo *Fusarium*”. Se han clasificado dos tipos de complejos; el complejo *Fusarium oxysporum* (F. o.), especie anamórfica que incluye cepas patógenas y no patógenas, el cual comprende patógenos que causan la

marchitez vascular y pudriciones de la corona y raíz en más de 100 especies de plantas, y el complejo *Fusarium solani* (F. s.), causante de la podredumbre radicular. Dichos complejos fueron propuestos en 1940 por Snyder y Hansen (Summerell y Leslie, 2011). Las patologías producidas por especies de los complejos F. o. y F. s. se pueden desarrollar en todos los estadios de crecimiento vegetativo si se presentan las condiciones para el desarrollo de la enfermedad (Barruena *et al.*, 2018).

Por otra parte, las cepas individuales suelen infectar sólo una o pocas especies de plantas, por lo tanto, se han asignado como formas especiales (f. sp.) basadas en la especificidad del hospedante, existen más de 120 f. sp. descritas hasta el momento.

Enfermedades causadas por *Fusarium*

En conjunto, los hongos del género *Fusarium* producen metabolitos tóxicos que ocasionan enfermedades caracterizadas por marchitez, tizones y pudriciones en cultivos agrícolas. Las especies patógenas de los complejos de *Fusarium* spp. ocupan el quinto lugar en una lista de los 10 principales patógenos fúngicos (López-Bautista *et al.*, 2020), junto a géneros como *Phytophthora* spp. y *Rhizoctonia* spp., entre otros, que han sido considerados como un complejo fitopatogénico que en condiciones favorables causan la marchitez (Rubio-Ríos, 2018).

Fusarium tiene una amplia distribución geográfica ya que su presencia se ha reportado en diferentes países. En la Tabla 1, se evidencia que este patógeno afecta a diversos hospederos, tales como frutales, hortalizas, plantas de ornato y árboles forestales. También se muestran reportes de que el cultivo de *A. tequilana* var. azul es afectado por el complejo *Fusarium*, en algunos casos el complejo comprende más de cinco especies, como *F. oxysporum* (FOSC), complejo *Fusarium solani* (FSSC) y complejo *F. fujikuroi* (FFSC). Lo mismo sucede con el cultivo de clavel y de la caña de azúcar, aunque coinciden con la presencia de *F. oxysporum* y *F. solani*, difieren en el resto de las especies del complejo. También se destaca a *F. oxysporum* como la especie más frecuente en la mayoría de las plantas hospederas aquí citadas, en segundo lugar, se reporta a *F. solani* como parte de un complejo. Como se puede observar, *Fusarium* es huésped de diversos cultivos con diferente distribución geográfica, debido a su plasticidad ecológica es capaz de colonizar con facilidad los sustratos. Esto coincide ya que según datos de la American Phytopathological Society (APS), aproximadamente el 81% de las plantas económicamente importantes tiene al menos una enfermedad causada por *Fusarium*.

Tabla 1. Especies patógenas asociadas al complejo *Fusarium* causantes de enfermedades en diferentes hospederos.

Planta hospedera	Nombre científico	Especies patógenas	Distribución geográfica	Referencia
Agave	<i>A. tequilana</i> var. azul	<i>F. oxysporum</i> del complejo de especies <i>F. oxysporum</i> (FOSC), <i>F. solani</i> , <i>F. falciforme</i> y <i>Fusarium</i> sp. del complejo <i>Fusarium solani</i> (FSSC) y <i>Fusarium</i> sp. del complejo <i>F. fujikuroi</i> (FFSC)	México	López-Bautista <i>et al.</i> , 2020
Agave	<i>A. tequilana</i> var. azul	<i>F. oxysporum</i> , <i>F. fujikuroi</i> , <i>F. solani</i> y <i>F. incarnatum-equiseti</i>	México	Mendoza-Ramos <i>et al.</i> , 2021
Agave	<i>A. tequilana</i> var. azul	<i>F. oxysporum</i> y <i>F. solani</i>	México	Ramírez-Ramírez <i>et al.</i> , 2017
Agave	<i>A. tequilana</i> var. azul	<i>F. oxysporum</i>	México	Quiñones-Aguilar <i>et al.</i> , 2023
Agave	<i>A. tequilana</i> var. azul	<i>F. oxysporum</i>	México	Gómez-Ortiz <i>et al.</i> , 2011
Agave	<i>A. tequilana</i> var. Azul	<i>F. oxysporum</i>	México	Flores-López <i>et al.</i> , 2016
Plátano	<i>Musa paradisiaca</i>	<i>F. oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i>	Brasil	Silva <i>et al.</i> , 2010
Mango	<i>Mangifera indica</i>	<i>F. mexicanum</i>	México	Rodríguez <i>et al.</i> , 2012
Maracuyá	<i>Passiflora edulis</i>	<i>F. incarnatum</i> , <i>F. proliferatum</i> , <i>F. solani</i>	Colombia	Henao <i>et al.</i> , 2018
Fresa	<i>Fragaria ananassa</i>	<i>F. oxysporum</i> f. sp. <i>fragariae</i>	España	Infante <i>et al.</i> , 2018
Maíz	<i>Zea mays</i>	<i>F. sacchari</i> , <i>F. fujikuroi</i>	Brasil	Carret <i>et al.</i> , 2023
Calabaza	<i>Cucurbita ficifolia</i>	<i>F. acuminatum</i> , <i>F. proliferatum</i>	Argentina	Flores <i>et al.</i> , 2015
Garbanzo	<i>Cicer arietinum</i>	<i>F. oxysporum</i> f. sp. <i>ciceris</i> .	México	Oliva- Ortiz <i>et al.</i> , 2017
Tomate	<i>Solanum lycopersicum</i>	<i>F. oxysporum</i> f. sp. <i>lycopersici</i>	Mexico	Hernandez <i>et al.</i> , 2014
Chile	<i>Capsicum capsici</i>	<i>Fusarium</i> sp.	México	Anaya-López <i>et al.</i> , 2011
Chile habanero	<i>Capsicum chinensis</i>	<i>Fusarium</i> sp.	México	Reyes <i>et al.</i> , 2012
Soya	<i>Glycine max</i>	<i>Fusarium</i> sp.	Cuba	Cruz <i>et al.</i> , 2017
Caña de azúcar	<i>Saccharum officinarum</i>	<i>F. andiyazi</i> , <i>F. nygamai</i> , <i>F. sacchari</i> , <i>F. proliferatum</i> , <i>F. verticillioides</i> , <i>F. equiseti</i> , <i>F. oxysporum</i> , <i>F. solani</i>	México	Martínez-Fernández <i>et al.</i> , 2015
Apio	<i>Apium graveolens</i>	<i>F. oxysporum</i> f. sp. <i>apii</i>	Costa Rica	Retana <i>et al.</i> , 2018
Café	<i>Coffea arabica</i>	<i>Fusarium</i> sp.	Bolivia	Rudy <i>et al.</i> , 2011
Algodón	<i>Gossypium hirsutum</i>	<i>Fusarium solani</i>	México	González-Soto <i>et al.</i> , 2022
Clavel	<i>Dianthus caryophyllus</i>	<i>F. oxysporum</i> , <i>F. proliferatum</i> , <i>F. solani</i> , <i>F. tricinatum</i> , <i>F. globosum</i> , <i>F. incarnatum</i> , <i>F. equiseti</i> .	México	Camacho-López <i>et al.</i> , 2014
Pino	<i>Pinus patula</i>	<i>F. oxysporum</i> , <i>F. solani</i> .	México	Robles <i>et al.</i> , 2016

Impacto socioeconómico de la marchitez vascular en *Agave* por el complejo *Fusarium* (F.o.)

En México, el complejo *Fusarium* es el agente causal de la marchitez vascular en *Agave*, considerada como la enfermedad más importante debido a que afecta el rendimiento y la calidad de los productos derivados de esta planta, y por lo tanto origina grandes pérdidas económicas (López-Bautista *et al.*, 2020). En México, el problema fitosanitario de incidencia de la marchitez en agave se ha extendido en las últimas décadas en las zonas de Denominación de Origen del Tequila (DOT), como un efecto negativo de las condiciones climáticas. Asimismo, en el año 2008, el Consejo Regulador del Tequila reportó que en el estado de Jalisco, el daño por *F. oxysporum*, dentro de la zona agavera, la incidencia alcanzó el 40% de las plantaciones (Flores *et al.*, 2016) y en 2010, este hongo destruyó el 35% de la cosecha de agave azul en México causando pérdidas económicas para los agricultores, con un incremento en el costo de producción (Gómez-Ortiz *et al.*, 2011). Respecto a la fitosanidad de *A. tequilana* var. Azul, se reportó que la incidencia de la marchitez vascular causada por *F. oxysporum* fue del 40 al 100% en los estados de Jalisco y Nayarit (Flores *et al.*, 2016). En 2017, en los municipios de la Región de los Altos de Jalisco, de 1,037 plantaciones el 32.4% se encontraron libres de la marchitez, mientras que el 46.5% registró una incidencia baja y 21.1% una incidencia alta considerada de riesgo fitosanitario debido a que la incidencia fue del 50% para Tepatitlán de Morelos, pero el mayor porcentaje de incidencia se presentó en Arandas, Jal. durante 2017. La presencia de esta

enfermedad se observó en todas las edades de la plantación, sin embargo, la severidad más grave se dio en plantaciones de 3, 4 y 5 años (DGSV-CNRF, 2017). También se reportó que la disminución del rendimiento de las piñas y la pérdida de plantaciones fueron desde el 30 al 100 % (López-Bautista *et al.*, 2020).

Estos datos coinciden con los registros de la base digital del CRT al generar un mapa de incidencia de la marchitez en los municipios con DOT, donde el mayor porcentaje de incidencia lo presentó el municipio de Arandas (Figura 2). De acuerdo a la literatura consultada, la marchitez no solo afecta significativamente la productividad de *Agave tequilana* var. Azul, sino también, la producción de agaves mezcaleros como *A. cupreata*, *A. angustifolia* y *A. potatorum* en el sureste de México.

Epidemiología de la marchitez vascular causada por los complejos de *Fusarium*

Estudios de la epidemiología del marchitamiento en *Agave tequilana* por *Fusarium*, donde se incluyen ensayos de inoculación de plantas en vivero con cepas de *F. oxysporum* realizados en condiciones de invernadero en Jalisco, revelaron la aparición de síntomas de necrosis marrón rojiza en raíces y parte inferior del tallo. De la misma manera se presentaron síntomas de pudrición en raíces jóvenes inoculadas con *F. solani*, indicando que esta especie está altamente relacionada con el marchitamiento del agave (Ramírez- Ramírez *et al.*, 2017).



Figura 2. Incidencia de la marchitez en *Agave tequilana* Weber var. Azul en el municipio de Arandas Jalisco, México, ubicado en la zona de denominación de origen, durante 2017. (Datos digitales del CRT, 2022).

Estudios realizados por López *et al* (2020) en 40 plantaciones comerciales de agave azul, ubicadas en 13 municipios de los altos de Jalisco, reportaron que los análisis basados en la caracterización morfológica, molecular y filogenética, así como en estudios microbiológicos y fisicoquímicos, revelaron la presencia de especies de *Fusarium* pertenecientes a los complejos *F. oxysporum* (FOSC), *F. solani* (FSSC) y *F. fujikuroi* (FFSC), por lo que concluyeron que la marchitez y la pudrición seca del cogollo del agave son expresiones sintomatológicas de un síndrome causado por diferentes especies de *Fusarium* con adaptabilidad parasítica diferencial a nivel intra e inter especie y que ambas enfermedades de alto impacto económico pueden ser causadas por un mismo aislado (haplotipo) de *F. oxysporum*, *F. solani* y *F. falciforme*, pero no son los más prevalentes, lo que explica la baja incidencia de ambos síntomas en la misma planta de *Agave tequilana* variedad Azul.

Por lo anterior, es importante aplicar un manejo agronómico fitosanitario adecuado y sustentable para este cultivo, en virtud de que el cultivo de agave generó una derrama económica significativa según el Servicio Integral Agropecuario y Pesquero (SIAP, 2019). Las estadísticas del CTR reportaron que en 2022 se exportaron 418.9 millones de litros de tequila (CTR,2024), mientras que para el mezcal se reportaron 14,165,505 millones de litros, exportados el mismo año (CRM,2024), esto representa una derrama económica importante para el país.

Implicaciones de la marchitez vascular en *Agave*

La marchitez en agave no solo repercute en la economía, sino también en la salud, debido a que *Fusarium* aumenta su virulencia al segregar toxinas, tales como, eniatinas, ácido fusárico, tricotecenos, fumonisinas, las cuales pueden resultar en daños carcinogénicos, mutagénicos, teratogénicos, citotóxicos, neurotóxicos y nefrotóxicos en la salud humana (Wagacha y Muthomi, 2007). Ante esta virulencia por *Fusarium*, la planta hospedera genera distintos mecanismos de defensa como: síntesis de enzimas de detoxificación, de proteínas de resistencia y de proteínas antifúngicas (Ma *et al.*, 2013; Kebede *et al.*, 2020), de señales de genes de resistencia, la descomposición enzimática de barreras físicas del patógeno, la defensa con compuestos antifúngicos del anfitrión y la inactivación y muerte de las células huésped por micotoxinas segregadas en el reconocimiento del agente causal (Durrant y Dong, 2004). Asimismo, se activan como respuesta a la presencia del agente biótico las defensas constitutivas o preformadas tales como: la lignificación, suberización y la formación de calosas que pueden estar presentes durante el ciclo de vida de la planta o

formarse al momento de la infección del patógeno (Montes-Belmont, 2009), así como las defensas químicas: producción de fenoles, saponinas, antocianinas, flavonoides, glucocinatos, etc. (Lustre-Sánchez, 2022).

Ciclo biológico de *Fusarium* spp. en *Agave*

Los ciclos de infección se desarrollan en tiempo y espacio, de manera leve o severa, agresiva o sutil y la interacción del hospedero influenciado por el ambiente o la interferencia del hombre (López-Bautista *et al.*, 2020). Dentro del componente clima, el sistema epidemiológico de la marchitez por *Fusarium* sp., la temperatura y humedad son los principales factores que regulan los ciclos de infección. Los ciclos de infección se desarrollan con más severidad en regiones de alta montaña debido a la humedad que guarda el suelo, siendo esta una de las condiciones que favorece el desarrollo de *Fusarium*, sin embargo, en las zonas de menos altitud la marchitez del agave es menos severa (Flores-López *et al.*, 2016). En términos generales, el ciclo de infección empieza cuando la planta muere y cae al suelo, el micelio y las clamidosporas son liberadas (Figura 3), éstas germinan en condiciones de temperaturas de entre 10 a 25 °C y humedad relativa de 74%, e invaden las raíces del huésped; el micelio avanza intercelularmente y penetra por xilema, posteriormente el hongo se desarrolla en las traqueidas y el tejido parenquimatoso (Rodríguez-Garay *et al.*, 2015; Flores-López *et al.*, 2016; Ramos *et al.*, 2017). Los síntomas de las plantas infectadas por *F. oxysporum* son: pérdida de la turgencia, los agaves se debilitan y adquieren una tonalidad que va del verde claro al amarillo-verdoso, en la base de la piña y el cogollo se observa una pudrición seca. Posteriormente, las pencas se enrollan o “encarrujan” y en la base de la piña se observa necrosis y en algunos casos se observa la pudrición seca del cogollo, finalmente, muere la planta y el ciclo se repite bajo las condiciones propicias antes mencionadas. La infección de los hijuelos puede producirse por infección de la planta madre, por semillas o por el suelo no desinfectado (Villa-Martínez *et al.*, 2015; Flores *et al.*, 2016; DGSV-CNRF, 2017). Es posible que el hongo se disemine a las plantas sanas por contacto directo con enfermas, también la transmisión puede ser por la semilla infectada (Delgado-Ortiz *et al.*, 2016). Se ha encontrado el complejo *Fusarium* en plantaciones de un año, por el uso de hijuelos provenientes de plantas aparentemente sanas (Flores *et al.*, 2010). La colonización de los tejidos y de la raíz probablemente no sólo dependen de la cepa del hongo, sino también de la especie y del manejo de la planta. Las condiciones hídricas son de vital importancia para el agave ya que cuando existe poca disponibilidad de agua en el suelo donde se cultiva agave, se puede disminuir el crecimiento de las

plantas debido a que se afectan los procesos fotosintéticos y de respiración y las hojas pierden turgencia lo que conlleva al marchitamiento (Campbell y Benson, 1994).

Métodos de control del Complejo *Fusarium* y perspectivas de manejo de la marchitez vascular en *Agave*

Actualmente, es complicado controlar a *Fusarium* debido a que este hongo tiene una larga supervivencia en el suelo gracias a sus estructuras de resistencia como son las clamidosporas, sin embargo, para el manejo de la marchitez en agave se han implementado diferentes medidas desde el marco legal, dispuestas en el Diario Oficial de la Federación (2013) y que, a través de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), se le encomendó al Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) la reglamentación pertinente para el establecimiento, cosecha, control cultural, químico y biológico del *Agave*, cuyos agentes causales se consideran a cinco especies de *Fusarium* pertenecientes a los complejos *F. oxysporum* (FOSC), *F. solani* (FSSC) y *F. fujikuroi* (FFSC), reportados por López-Bautista et al. (2020), además de *Thielaviopsis paradoxa*, *Cercospora agavicola* y *Pectobacterium carotovorum* (DOF, 2013).

Control cultural

El control cultural es una de las primeras prácticas agronómicas empleadas como parte del manejo integrado de plagas, que consiste en conservar la sanidad del suelo mediante la destrucción de residuos vegetales enfermos, desinfección de herramientas, poda sanitaria, así como fertilización adecuada y jimas de recuperación fitosanitaria y evitar establecer plantaciones en la época con mayor humedad en el suelo y ambiente (Tlalpal-Bolaños, 2014). Esta diversidad de actividades puede contribuir a mejorar la calidad de la producción, así como el rendimiento y una mejora ambiental. Una de la principales actividades que ha puesto en riesgo al cultivo del agave es el monocultivo durante largos periodos de tiempo, esto ha permitido identificar impactos ambientales negativos, por ejemplo, la alta vulnerabilidad de sistemas ecológicamente artificiales y genéticamente homogéneos frente al cambio climático, resiliencia baja a eventos climáticos extremos y susceptibilidad a plagas, la carencia de biodiversidad y suelo biológicamente activo, ineficiente reciclaje de nutrientes y dependencia a insumos externos y un alto empleo de agroquímicos (Gliessman, 2013). Hoy en día se recomiendan los policultivos por la diversificación productiva, el uso de tecnologías ecológicas, mayores rendimientos, reducción del daño por plagas y maleza y mejorar la eficiencia del uso de agua, energía, luz y nutrientes, porque las diferentes especies de plantas se ubican en diferentes alturas, doseles y necesidades, también tienen una mejor eficiencia edáfica (Yahuza, 2011).

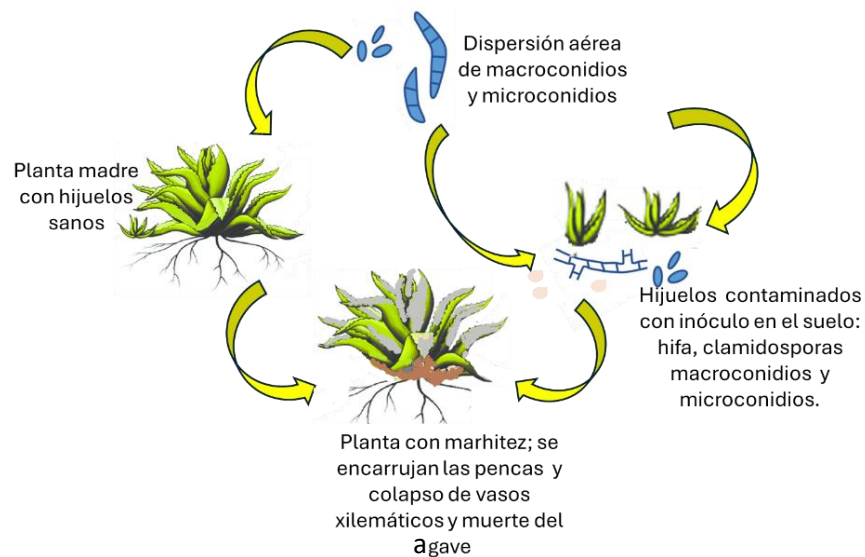


Figura 3. Ciclo de la marchitez seca en plantas de *Agave* causada por *Fusarium* spp. La diseminación de la enfermedad puede ser aérea, los microconidios caen sobre las hojas o pencas de agave y se empiezan a encarrujar. El tejido infectado cae al suelo y las esporas y/o clamidosporas infectan a las raíces secundarias. A partir de la planta madre infectada también es posible que los hijuelos se contaminen.

Control químico

El control químico en el cultivo de agave comprende bactericidas, insecticidas, fungicidas y herbicidas. Estos últimos, son de gran importancia debido a que la maleza es uno de los problemas fitosanitarios agrícolas más importantes. En el cultivo de agave las malezas de hoja ancha y hoja angosta representan una grave problemática; si no se controlan de manera adecuada pueden ocasionar severos daños al crecimiento y desarrollo de la planta y por lo tanto los rendimientos disminuyen debido a la competencia por espacio y nutrientes con estas malezas, además de convertirse en plantas hospederas de insectos plaga y vectores de enfermedades como la marchitez vascular ocasionada por los complejos de *Fusarium* (Ma et al., 2013). Para el caso del manejo de malezas hospedantes de *Fusarium*, en los cultivos de agave es importante evitar el uso de herbicidas no selectivos como el glifosato y el glufosinato de amonio de amplio espectro, debido a su alto grado de toxicidad en plantas y humanos. Por lo tanto, se recomienda sustituir su uso con cubiertas vegetales entre las hileras del cultivo como una acción ecológica (Tlapal-Bolaños, 2014).

Por otra parte, ante la presencia de la marchitez en agave causada por *Fusarium*, se ha reportado el control químico como la acción más común y eficiente para el manejo de los complejos de *Fusarium* sobre agave (Tabla 2). Para el caso del control de *F. oxysporum* se ha reportado la aplicación de Sulfato de cobre pentahidratado y Metanosulfonato de Etilo con una efectividad del 95% y 71% respectivamente, aunque tienen efectos de residualidad. Sin embargo, se ha encontrado que el exceso de las aplicaciones de cobre en las plantas del género *Agave* reducen el desarrollo de nuevas raíces (Rubio-Cortés, 2007). También se ha reportado la aplicación Fluxatyroxad+piraclostrobina, que tiene acción preventiva y curativa al inhibir la germinación de las esporas y el crecimiento del micelio en el desarrollo de los hongos fitopatógenos con una efectividad del 80%. Pero, al igual que el Azoxystrobin, Procloraz y Difenconazole, fungicidas considerados ligeramente tóxicos (Ayala et al., 2005) presentan residualidad impactando negativamente al suelo, cuerpos de agua y ambiente (Martínez-Palacios et al., 2019), esto aunado a la eliminación de microorganismos benéficos en el suelo.

Respecto a los daños que los productos químicos producen a los animales y al ser humano se encuentran los de intoxicación por inhalación, contacto directo y acumulación en los tejidos grasos que a la larga se convierten en cancerígenos (Villa-Martínez et al., 2015).

Con respecto a lo anterior, resulta importante buscar estrategias más ecológicas para contrarrestar el impacto negativo de los productos químicos al controlar la marchitez en agave causada por el complejo de *Fusarium*.

Debido al daño ambiental provocado por el uso de los productos químicos para combatir a *Fusarium* en el cultivo de agave, es necesario buscar estrategias que aminoren el impacto ambiental negativo, y que disminuyan los costos de producción. A partir de la revisión documental analizada sobre los métodos alternativos para el control del complejo *Fusarium*, en la Figura 4 se presentan diferentes métodos de prevención y/o control y su porcentaje correspondiente de uso en laboratorio, invernadero y/o campo, en donde se destaca que el 33% de ellos hace referencia al empleo de los **agentes antagonistas**.

En este sentido desde hace tiempo se aplica el control biológico como un método alternativo efectivo, con casos de éxito, demostrando el potencial biológico de algunos microorganismos de utilidad para el control de diversos patógenos. Entre los microorganismos potenciales destacan los hongos y bacterias que son capaces de controlar enfermedades transmitidas por el suelo, a través de su actividad antagonista directa hacia los patógenos o compitiendo de manera indirecta por recursos espaciales y áreas tróficas comunes (Lecomte et al., 2016) y actuando como biocontrol de plagas y enfermedades en el agave y otros cultivos (*Trichoderma* y *Bacillus*). Además, han sido una alternativa para promover el crecimiento de las plantas. A este respecto, destaca la acción biológica del hongo del suelo *Trichoderma*, el cual tiene un amplio espectro de acción sobre agentes patógenos, por ejemplo, se ha reportado el control de la marchitez causada por el complejo *Fusarium oxysporum*, donde *T. viride* mostró una efectividad de control de hasta del 99%, según Manayay et al. (2016). Esto se debe a que *Trichoderma* tiene plasticidad ecológica, adaptabilidad y la capacidad por colonizar diferentes sustratos. También gracias a sus mecanismos de acción como resultado de su metabolismo, como son: competencia por espacio y nutrientes, antibiosis y micoparasitismo. Otra investigación que coincide es la de Tlapal-Bolaños et al. (2014) donde mencionan que la aplicación de *Trichoderma* spp. y *Bacillus subtilis* mostró una efectividad del 50%. De igual manera, el Consejo Regulador del Tequila reporta que en Jalisco a las plántulas de *Agave tequilana* les aplican tratamientos preventivos con *Trichoderma* y *Bacillus*, con la finalidad de evitar la presencia de patógenos como *Fusarium*, ya que este patógeno también afecta a la planta en el estadio de plántula. En la Tabla 3 se muestra la efectividad de la aplicación de *Trichoderma* spp. para el control de diferentes especies

de *Fusarium* en otros cultivos de importancia agrícola. Se puede observar que este patógeno ataca a diversos cultivos y que al utilizar *Trichoderma* para su control se usan diferentes especies de este antagonista cuya respuesta de efectividad tiene porcentajes diferentes que están en un rango de 90% al 26%. También se confirma que este problema fitosanitario causado por *Fusarium* no es exclusivo del agave, sino también de otros cultivos. Además, estos resultados indican que hay que tener cuidado en elegir al antagonista adecuado según la problemática en estudio.

Por otra parte, el 15% de los documentos analizados hace referencia al uso de los **extractos vegetales** de plantas de importancia agrícola como método alternativo para el control de *Fusarium*. Villa-Martínez *et al.* (2015) muestran evidencias pertinentes de un estudio sobre la efectividad biológica de diversas especies vegetales con propiedades fungicidas y/o bactericidas con alta eficiencia para el control de *Fusarium* spp. Almazán *et al.*, (2022) obtuvieron el extracto acetónico de *Agave cupreata* y determinaron el perfil fitoquímico por cromatografía en capa fina, y

se evaluó la inhibición del crecimiento micelial y producción de esporas; los resultados mostraron que el porcentaje de producción de esporas disminuyó un 92% para *Fusarium subglutinans*, debido a la presencia de alcaloides, flavonoides, saponinas and triterpenos que favorecen el biocontrol. Estos resultados son muy interesantes porque a partir de las mismas plantas de agave se puede tener un control sobre especies que pertenecen al complejo *Fusarium*, como es el caso de *F. subglutinans*. En estudios *in vitro* realizados por Rodríguez *et al.* (2007), donde se utilizó *Flourensia retinophylla* para el control de *F. oxysporum*, se logró una efectividad del 100%. Asimismo, Contreras-Arredondo *et al.* (2011), utilizaron por su parte, extractos de *Cowanai plicata* D. Don. contra este hongo patógeno, obteniendo también una efectividad biológica del 100%. Como se ve, estudios como estos revelan que *Fusarium oxysporum* se puede controlar mediante el uso de extractos vegetales para disminuir la incidencia de la marchitez seca en agave causada por el complejo *Fusarium*.

Tabla 2. Efectividad del control químico de *Fusarium* sp. en *Agave*.

Nombre comercial	Dosis	Huésped	Patógeno	Efectividad	Referencia
Sulfato de cobre pentahidratado	1.5 L/ha	<i>Agave</i> sp.	<i>F. oxysporum</i>	95%	Flores <i>et al.</i> , 2016
Fluxatyroxad+ piraclostrobina	1.5 L/ha	<i>A. tequilana</i> Weber variedad Azul	<i>Fusarium</i> sp.	80%	Nuño, 2005
Metanosulfonato de Etilo	15 mM	<i>A. americana</i>	<i>F. oxysporum</i>	71%	Reyes-Zambrano <i>et al.</i> , 2021

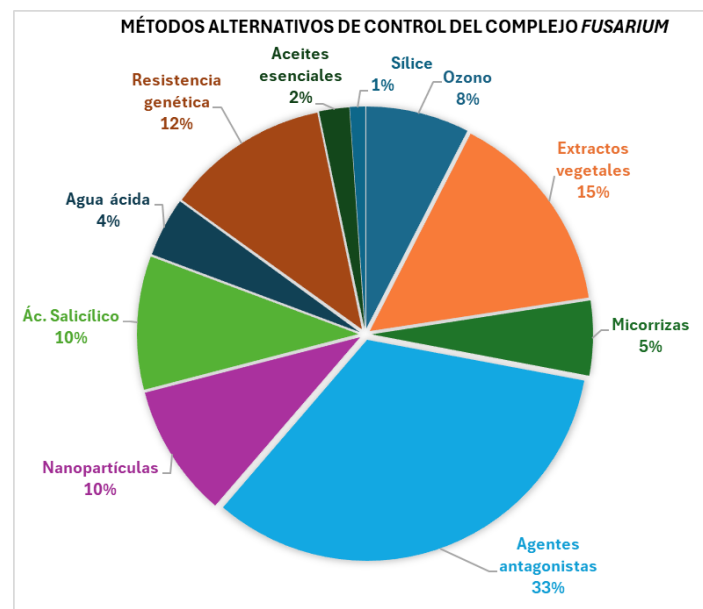


Figura 4. Resultados de la búsqueda de los métodos alternativos para el control del complejo *Fusarium* que afecta al agave y otros cultivos agrícolas.

Tabla 3. Efectividad biológica de *Trichoderma* spp. para el control de la marchitez causada por el complejo *Fusarium* en otros cultivos

Hospedero	Complejo <i>Fusarium</i>	Agente de control	Efectividad	Referencia
Tomate	<i>F. oxysporum</i> f. sp. Lycopersici, <i>F. oxysporum</i> f. sp. radialis-lycopersici, y <i>F. solani</i>	<i>T. viride</i>	90%	Manayay <i>et al.</i> , 2016
Mango	<i>F. oxysporum</i> <i>F. subglutinans</i>	<i>T. harzianum</i>	74% 64 %	Michel-Aceves <i>et al.</i> , 2005
Jitomate	<i>F. oxysporum</i>	<i>T. atroviride</i>	71%.	Yogalakshmi <i>et al.</i> , 2021
Maracuya	<i>F. solani</i> foram	<i>T. viride</i>	69%	Da Silva <i>et al.</i> , 2010
Tomate	<i>F. oxysporum</i>	<i>T. asperelloides</i> y <i>T. asperellum</i>	67% 63%	Rodríguez-García y Wang-Wong, 2020
Trigo	<i>F. graminearum</i>	<i>T. atroviride</i>	60%	Cabrera <i>et al.</i> , 2020
Soya	<i>Fusarium</i> sp.	<i>T. asperellum</i>	26 %	Cruz-Triana <i>et al.</i> , 2017

La **resistencia genética** se emplea un 12% dentro de los métodos importantes para el control de *Fusarium*. En su defensa, las plantas responden al ataque de los patógenos con barreras físicas como la pared celular y la cutícula, otro es la inmunidad adquirida por efectores (ETI), la cual incluye a los genes R, que codifican un grupo de proteínas tipo NBS-LRR, relacionadas con la resistencia de las plantas al entrar en contacto con los patógenos (Riva, 2010; Ma *et al.*, 2013; Villa-Martínez *et al.*, 2015). La inducción de resistencia sistémica en el hospedero es uno de los mecanismos indirectos de mayor interés en la actualidad. Dentro de los agentes de control reportados como efectivos elicitores de este mecanismo se encuentran varias especies del género *Trichoderma*, principalmente para controlar fitopatógenos foliares (Harman *et al.*, 2004), tal es el de la marchitez vascular del agave causada por el complejo *Fusarium*. Al respecto, existen estudios del género *Agave* para determinar su variabilidad genética, por ejemplo, en el estado de Sonora se estudiaron tres poblaciones de *A. angustifolia*. Los resultados mostraron un índice de similitud de 0.786 en las interpoblaciones y de 0.827 para las intrapoblaciones. La variabilidad promedio intrapoblacional fue de 0.26 y la distancia genética en una misma población de 0.106 y 0.093 (Barraza-Morales *et al.*, 2006), de esta manera se crean líneas genéticas resistentes. Recientemente, Reyes-Zambrano *et al.* (2021) reportaron estudios sobre la selección y análisis de polimorfismos en variantes somaclonales en *A. americana* resistentes a *F. oxysporum*, tratados con etil metasulfonato, donde se demostró que esta técnica causa mutaciones puntuales en células de callo mediante micropropagación de esta planta, lo cual deriva en cultivares genéticamente resistentes a este patógeno. En estas señales participa además la interacción de un gen de resistencia (R) del huésped con la proteína efectora del patógeno, a esto

se le conoce como inmunidad activada por efectores (ETI). Para que se genere esta defensa interviene la resistencia basal (PTI) y finalmente la resistencia sistémica adquirida (SAR). En este sentido, el ácido Salicílico (SA) brinda una señal importante en la activación de PTI y ETI. El salicilato de metilo (MeSA) derivado de SA es la parte activa de defensa para establecer la resistencia sistémica adquirida (Vlot *et al.*, 2009; Rangel *et al.*, 2010; Maruri-López *et al.*, 2019).

El uso de las **nanopartículas** en esta revisión ocupa el 10% (Figura 4). Es importante mencionar que las nanopartículas de plata (AgNPs) son agregados aislados del mismo metal, de tamaño de 1 a 100 nm (Sifontes *et al.*, 2010), que les confiere propiedades físicas, químicas y biológicas con aplicación efectiva y amigable al ambiente en diferentes campos como la agricultura. (Álvarez-Carbajal *et al.*, 2020). En la síntesis biológica de AgNPs se utilizan agentes reductores tales como las proteínas, péptidos, carbohidratos, bacterias, hongos, levaduras, algas y plantas (Cardoso, 2016). En investigaciones al respecto, se sintetizaron AgNPs con un tamaño de 30-150 nm de hojas de *Agave americana*, *Mentha spicata* y *Mangifera indica* para analizarlas y detectar su actividad biológica. Las sintetizadas de *A. americana* mostraron actividad significativa (96%) contra *Staphylococcus aureus*, resistente a la meticilina, contra *Escherichia coli* (95%) y *Fusarium oxysporum* (89%). Las AgNPs de *M. spicata* mostraron también una buena actividad antioxidante a 300 µL (79%) y a 1000 µL (88%) (Ahmad *et al.*, 2016). Álvarez-Carvajal *et al.* (2020) mostraron la efectividad de las AgNPs estabilizadas con quitosano (Qs) para el control de la marchitez vascular en tomate causada por *Fusarium oxysporum*, donde las nanoestructuras inhibieron el 70% del crecimiento micelial de este hongo. Este

método basado en la nanotecnología es una alternativa, eficaz, eficiente y ecológica ya que pueden responder al control de agentes patógenos.

El **ácido salicílico (SA)** ocupa el 10% de los métodos alternativos reportados para el control de *Fusarium*. Es una fitohormona natural de las plantas que presenta diferentes funciones de resistencia a factores abióticos (Horváth *et al.*, 2007; Yuan y Lin, 2008; Rivas-San Vicente y Plasencia, 2011) y bióticos (Khan *et al.*, 2015; Dempsey y Klessig, 2017). Además, induce resistencia basal a plagas y enfermedades, esto es, cuando el patógeno penetra en la planta se establecen señales que activan el efecto del ácido y con ello la resistencia a toda la planta. En Brasil, se evaluó el efecto del ácido salicílico sobre la inducción de resistencia a la secadera o damping-off en plántulas de remolacha, así como su actividad antifúngica sobre *Fusarium* sp. en cultivo *in vitro*. Se aplicaron concentraciones de 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 mM durante 5 min y se encontró que el SA indujo crecimiento de las plántulas y detuvo la enfermedad en la dosis de 2.0 mM (Bertocelli, *et al.*, 2016).

El uso del **ozono (O₃)**, por su parte, ocupa el 8% como un método alternativo contra *Fusarium*. Es un gas usado como desinfectante y esterilizante y ha tenido auge desde hace más de 30 años en la industria, casas, hoteles, centros de salud y en la agricultura (Chuaqedton *et al.*, 2015; Erazo, 2012). Por su alto poder oxidante, presenta efecto sobre virus, hongos y bacterias, en éstas últimas destruye la membrana celular por la vía de las glucoproteínas y glucolípidos, lo cual depende de la concentración aplicada (García-Chamizo *et al.*, 2020). Para medir la concentración de ozono como máximo 0.11 ppm (0.2354 mg·m⁻³, conforme a la NOM-020-SSAI-1994), ya sea en gas o líquido, se determina con los métodos: Yodométrico, Absorción de luz UV, Amperimétrico o por Colorimetría (Beutelspacher y Calderón, 2005). Al respecto, Erazo (2012) construyó un ozonificador con capacidad de 300 m³ en la purificación de ambientes. Para probarlo se realizaron dos ensayos, en el primero se aplicó el ozono en una superficie de 400 cm² con bacterias y hongos contaminantes aislados en medios de cultivo puros, el tiempo de exposición fue de 1, 5 y 60 minutos de contacto; con el tiempo de exposición las colonias de hongos y bacterias disminuyeron de 500 a 18 colonias. En el segundo ensayo se probaron bacterias heterótrofas totales (122, 324, 412, 640 colonias), además de mohos y levaduras (4, 8, 12 y 22 colonias). El ozono tuvo un control para bacterias del 44.2 a 91.7% y, para mohos y levaduras, del 66 al 100%. Por otro lado, Chuaqedton *et al.* (2015) evaluaron la efectividad de las miliburbujas y microburbujas de ozono en el control postcosecha del moho verde (*Penicillium digitatum*) en mandarina,

durante 0, 15, 30, 45 y 60 min de exposición. Las microburbujas mostraron mejores resultados a partir de los 15 min de exposición y a los 60 min las esporas se deformaron.

El empleo de **micorrizas** registra un 5% contra *Fusarium*. El uso de ellas se encuentra ampliamente extendido gracias a los efectos de las especies de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en las enfermedades del marchitamiento vascular, ya que mejoran la resiliencia de las plantas a los desafíos ambientales, estimulan el desarrollo de las raíces, el crecimiento de las plantas y mejoran la tolerancia a los patógenos transmitidos por el suelo, como es el caso del género *Fusarium*. La inoculación dual de HMA, *Pseudomonas fluorescens* y *Trichoderma* sp. se encuentran entre los agentes de biocontrol más eficaces contra las enfermedades del marchitamiento vascular (Boutaj *et al.*, 2022). En el estado de Michoacán, consorcios de hongos micorrízicos tuvieron efecto en el biocontrol de *F. oxysporum* al ser inoculados en plantas de *Agave cupreata*, en condiciones de invernadero, ya que disminuyeron la severidad de la marchitez en un 41% y promovieron el crecimiento vegetal con la micorización al incrementar la biomasa seca total de las plantas, luego de 240 días de inoculación (Trinidad-Cruz *et al.*, 2017). Robles-Martínez *et al.* (2013), determinaron que existe una compatibilidad funcional de inóculos nativos de hongos de micorriza arbuscular (HMA) en hijuelos vegetativos (HI) y bulbilos florales (BU) de *Agave angustifolia*, utilizando parámetros de crecimiento y nutrición como indicadores. Esto muestra que hay una interacción positiva entre las micorrizas y plantas de agave y que a su vez le proveen de múltiples beneficios nutricionales y ecológicos. Por su parte, Quiroga-Rojas *et al.* (2012) en estudios *in vitro*, utilizaron un consorcio de micorrizas con *Azotobacter* spp., *Azospirillum* spp., *Trichoderma* spp. y *T. lignorum* contra *Fusarium* sp., logrando una efectividad del 93%. Estos resultados confirman que usar micorrizas para el control de la marchitez en agave puede ser efectivo y que puede derivar en la disminución de costos y en el impacto negativo al ambiente provocado por la aplicación de los químicos contra el complejo *Fusarium*.

En la presente revisión se encontró también que el **agua ácida** se usa en un 4%. El agua ácida se produce por electrólisis de sales como NaCl, KCl o MgCl₂, con o sin el uso de diafragmas de platino (Pt), platino más iridio (Pt + Ir) o dióxido de iridio (IrO₂). Se aplica en nebulizaciones a los cultivos frutícolas y hortalizas en invernadero para el control de virus, bacterias y hongos (Gómez *et al.*, 2017). En un estudio se probó el control de nueve bacterias y tres hongos (10⁵-10⁶ UFC/mL), se trataron de 1-20 minutos con agua electrolizada, los

resultados mostraron efectividad al utilizar agua electrolizada con diafragma y sin diafragma; la solución salina estéril no tuvo control alguno (Myung-Ho *et al.*, 2004). Yamaki y Schörner (1995) realizaron un estudio en plantas de pepino con mildiú pulverulento para evaluar su control con agua ácida (pH de 2.4) y agua alcalina fuerte (pH de 11.5). Se probaron cuatro tratamientos: el primero con fungicida convencional, el segundo, agua ácida, el tercero, agua ácida alternada con agua alcalina y el cuarto sin aspersión. Entre los días 16 y 31 después del trasplante, los síntomas se propagaron rápidamente en la superficie sin control, mientras que en el área de aspersión con el fungicida los síntomas fueron reprimidos. El agua ácida redujo los síntomas del mildiú pulverulento de las hojas de pepino a partir del día 18, durante aproximadamente dos semanas. En otra investigación se probó el agua ácida en cepas de 8×10^7 esporas mL^{-1} de los hongos: *Botrytis cinerea*, aislado de zarzamora, *Colletotrichum gloeosporioides* aislado de mango, guayaba y lichi, *Fusarium solani* aislado de chile y estevia, *Monilinia fructicola* aislado de durazno, *Penicillium digitatum* aislado de limón mexicano y limón persa, *Penicillium* sp., aislado de papaya y *Rhizopus stolonifer* aislado de yaca y guanábana, para evaluar su efectividad. Los resultados mostraron ser efectivos en el control de las cepas antes mencionadas en 24 y 48 horas (Gómez *et al.*, 2017).

En relación al uso de los **aceites esenciales**, en esta revisión se registró un 2% como un método contra el hongo *Fusarium*; es diverso el origen vegetal de donde se extraen estos productos, la mayoría de los estudios reportados son *in vitro*, los cuales muestran una eficiencia de hasta 100% para el control de *Fusarium*, por ejemplo, Vásquez *et al.* (2013), reportan el uso de *Chenopodium album* y *C. ambrosioides* para el control de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* y *F. solani* con una eficiencia del 100%; resultados similares obtuvieron Balanta *et al.* (2013) al utilizar *Thymus vulgaris* contra *Fusarium* sp., mientras que Zhao *et al.* (2013) al aplicar *Inula britannica* contra *Fusarium oxysporum* lograron una eficiencia del 96%. Estos resultados muestran también la efectividad de los aceites esenciales para el control del complejo *Fusarium*.

El **sílice** ocupa el 1% como un método alternativo reportado. García-Ramos *et al.* (2018), demostraron que la aplicación de fertilizantes complementados con sílice al 20% disminuyó hasta en un 40% la severidad e incidencia de la marchitez en tomate causada por *F. oxysporum*, demostrando que su uso puede ser una opción para el tratamiento contra *Fusarium*. Aunque en la revisión bibliográfica no se encontraron más documentos al respecto, esto es una oportunidad para generar investigaciones que apoyen estos resultados.

DISCUSION

La situación actual del agave, según el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria menciona que esta planta es muy importante para México, ya que su cultivo y su industria representa una importante fuente de ingresos para los productores, industrializadores y comercializadores de este producto agrícola; sin embargo, en los últimos años este cultivo ha sido afectado por *Fusarium* causante de la marchitez seca, ocasionando daños de importancia económica en las plantaciones. Por este motivo y con el objetivo de reducir los niveles de incidencia de este patógeno mediante una estrategia ecológica y de bajo costo, se ha realizado esta revisión documental de 10 métodos alternativos (químicos, biológicos, ecológicos y fitosanitarios), para tener un panorama más amplio de las posibles actividades preventivas o correctivas que a lo largo de 30 años se han usado para el control de la marchitez en agave y otros cultivos, como referencia para generar alternativas de solución en el sector productivo.

Sin embargo, es importante destacar que esta revisión ha tratado de evaluar las perspectivas actuales para el control del complejo *Fusarium* causante de la marchitez en agave y otros cultivos, pero, es importante considerar las condiciones agroclimáticas y geográficas, así como las características de los hospederos de este patógeno porque tienen un papel importante en la respuesta de control de los métodos alternativos. También hay que reconocer que éstos tienen buena eficiencia según los resultados mostrados en este documento, además de ser ecológicos y de bajos costos para ser utilizados en futuras investigaciones.

CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis realizado en la literatura consultada, es importante reconocer que la marchitez vascular es una de las principales enfermedades del agave y es causada por varias especies del género *Fusarium* que en su conjunto conforman un “complejo”. Ante la problemática fitosanitaria actual, es necesario implementar métodos alternativos, efectivos, ecológicos y rentables, de manera complementaria al manejo agronómico en el cultivo del agave. Al respecto, la aplicación de agentes biológicos como *Trichoderma* y *Bacillus*, las micorrizas, extractos vegetales y aceites esenciales, el ozono, ácido salicílico, agua ácida y el uso de nanopartículas, se reportan ser efectivos como estrategias alternativas y han demostrado ser eficientes para el control preventivo y correctivo de esta enfermedad. Sin embargo, se necesitan desarrollar

estudios más amplios y recientes sobre la eficiencia de estos y otros métodos alternativos para el combate sustentable y ecológico de los diversos complejos de *Fusarium* reportados como causantes de la marchitez en agave y otros cultivos agrícolas.

Funding. This research was funded by the National Council of Science and Technology (CONACYT) through the doctoral scholarship with registration number DICARM-1321.

Conflict of interest. The authors declare that they do not have conflicts of interest.

Compliance with ethical standards. Does not apply.

Data availability. Data is available from Dr. Amaury-M. Arzate-Fernández (corresponding author: upon request).

Author contribution statement (CRediT). M.C. Corona-Rodríguez-Conceptualization, data curation, investigation, writing-review editing. H.G. García-Núñez- Conceptualization, methodology, investigation, format analysis. A.M. Arzate-Fernández- Conceptualization, investigation, project administration, visualization, validation, writing-review and editing. T.H. Norman-Mondragón - investigation, methodology, visualization. V. Lamus-Molina- Investigation, methodology, writing-review and editing.

REFERENCES

- Andrés, J.L., Vicente, M.J., Cenis, J.L., Collar, J. y Tello, J., 2001. Variación genética y patogénica de *Fusarium oxysporum* f. sp. *dianthi* en España. *Boletín de Sanidad Vegetal de Plagas* 7, pp 249-257.
- Anaya, J.L., González, M.M., Villordo, E., Rodríguez, R., Rodríguez, R., Guevara, R.G., Guevara, L., Montero, V. and Torres, I., 2011. Selección de genotipos de chile resistentes al complejo patogénico de la marchitez. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2, pp. 373-383. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200709342011000300006&lng=es&tlng=es.
- Álvarez, F., González, T., Armenta, A.D., Méndez, R., Eaquer, E., Juárez, J. y Encinas, D., 2020. Silver nanoparticles coated with chitosan against *Fusarium oxysporum* causing the tomato wilt. Nanopartículas de plata recubiertas con quitosano contra la marchitez vascular causada por *Fusarium oxysporum* en plántulas de tomate. *Biotechnia*, 22, pp. 73-80. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v22i3.952>
- Ahmad, B., Shireen, F., Bashir, S., Khan, I. y Azam, S., 2016. Green synthesis, characterization and biological evaluation of AgNPs using *Agave americana*, *Mentha spicata* and *Mangifera indica* aqueous leaves extract. *Nanobiotechnology*, 10, pp. 281-287. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2015.0053>
- Almazán, A., Moreno, M.E., Hernández, E., Vázquez, M., Mora, J.A., Cabrera, E., y Alvarez, P., 2022. Phytochemical profile and in vitro activity of *Agave angustifolia* and *A. cupreata* extracts against phytopathogenic fungi. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 40, pp 169-187. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2202-6>
- Arbeláez, T.G., 2000. Algunos aspectos de los hongos del género *Fusarium* y de la especie *Fusarium oxysporum*. *Agronomía Colombiana*, 17, pp. 11-22. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=CO20020021127>
- Ayala, S.J.L., Mur, R.R., Ferrer, G.C.A. y Castellanos, L., 2005. Programa Especial para la Seguridad Alimentaria y el Desarrollo Rural (PESA-FAO) en la República Bolivariana de Venezuela, pp. 54-57. <https://www.fao.org/americas/programas-y-proyectos/es/>
- Balanta, J.F., Ramírez, L. and Caicedo-Bejarano, L.D., 2013. Características fisicoquímicas y actividad antimicótica del extracto de tomillo sobre cepas *Fusarium oxysporum*. *Ingenian*, 7, pp. 29-35.
- Barraza, A., Sánchez, F.L., Robert, M., Esqueda, M. and Gardea, A., 2006. Variabilidad genética en *Agave angustifolia* Haw. de la Sierra Sonorense, México, determinada con marcadores AFLP. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29, pp. 1-8. <https://doi.org/10.35196/rfm.2006.1.1>
- Bertoncelli, D.J., Mazaro, S.M., Serrão, R.R.C.D., Locatelli, N., Lewandowski, A. and Wagner, J.A., 2016. Ácido salicílico na indução de resistência ao tombamento de plântulas de beterraba e atividade antifúngica contra *Fusarium* sp., in vitro. *Semina: Ciências Agrárias*, 37, pp. 67-75.

- <https://www.redalyc.org/pdf/4457/445744667007.pdf>
- Beutelspacher, S.E., and Calderón, A.J.M., 2005. Diseño y construcción de un generador de ozono para aplicaciones de purificación de agua. CENIDET, Cuernavaca, México, pp. 1-151. https://nanopdf.com/download/diseo-y-construccion-de-un-generador-de-ozono-para_pdf
- Booth, C., 1971. The genus *Fusarium*. Commonwealth. Mycological Institute, Kew, pp. 32-35.
- Boutaj H., Meddich A., Roche, J., Mouzeyar, S., and El Modafar C., 2022. The effects of mycorrhizal fungi on vascular wilt diseases. *Crop Protection*. 155. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261219422000345?via%3Dihub>
- Bragulat, M.R., Martínez, E., Castellá, G., and Cabañes, F.J., 2004. Selective efficacy of culture media recommended for isolation and enumeration of *Fusarium* spp. *Journal of Food Protection*, 67, pp. 207-11. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-67.1.207>
- Cabrera, M., Garmendia, G., Rufo, C., Pereyra, S., and Vero, S., 2020. *Trichoderma atroviride* como controlador biológico de fusariosis de espiga de trigo mediante la reducción del inóculo primario en rastrojo. *Terra Latinoamericana Número Especial*, 38, pp. 629-651. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.664>
- Camacho, M.D., Valenzuela, C., and Hernández, R., 2014. *Fusarium* spp. asociadas a clavel (*Dianthus caryophyllus* L.) en Baja California, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5, pp. 1409-1415. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342014001001409&lng=es&tlng=es.
- Campbell, C.L., and Benson, D.M., 1994. Epidemiology and Management Root Diseases. North Carolina state University. Department of plant Pathology. pp 334.
- Cardoso, P.C., 2016. Nanopartículas de plata: obtención, utilización como antimicrobiano e impacto en el área de la salud. *Revista Hospital de Niños*, 58, pp. 19-28. <http://revistapediatria.com.ar/wp-content/uploads/2016/04/260-Nanoparti%CC%81culas-de-plata.pdf>
- Cardona, L.F., and Castaño, J., 2019. Comparación de métodos de inoculación de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Sacc.) Snyder and Hansen, causante del marchitamiento vascular del tomate. *Revista Académica Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 43, pp. 1-7. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.854>.
- Carrer, R., Guimarães, M., Abreu, V., Pereira R., Alves G., Menezes, R., Dias, D.V., and Marcos, G.C., 2023. *Fusarium sacchari* associated with stem rot in sweet corn in Brazil. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 53. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=253074416005>
- Chandra, N.S., Wulff, E.G., and Udayashankar, A.C., 2011. Prospects of molecular markers in *Fusarium* species diversity. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 90, pp. 1625–1639. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3209-3>
- Chua Jedton, A., Uthaibutra, J., Whangchai, K. and Nuanaon, N., 2015. Ozone microbubbles disinfection technique to inactivate *Penicillium digitatum* in suspension. *Acta Horticulturae Procedure IIInd Southeast Asia Symposium on Quality Management in Postharvest Systems* Eds.: Acedo, A.L. Jr. and Kanlayanarat, S. *Acta Horticulturae*, 60, pp. 355-358. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1088.60>
- Contreras, M.E., Hernández, F.D., Sánchez, A., Gallegos, G., and Jasso De Rodríguez, D., 2011. Actividad Fungicida de Extractos de *Cowania plicata* D. Don. contra *Fusarium oxysporum* Schlechtend. Fr. y de *Pistacia lentiscus* L. contra *Colletotrichum coccodes* Wallr. *Revista Agraria Nueva Epoca*, 8, pp 6-13.
- C.R.M., Consejo Regulador del Mezcal., 2020. El mezcal, la cultura líquida de México. Informe estadístico. pp.26. https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Desarrollo_Economico/vol6num18/Revista_de_Development_Econ%C3%B3mico_V6_N18_3.pdf

- C.R.M., Consejo Regulador del Mezcal., 2024. El mezcal, la cultura líquida de México. Informe estadístico. pp.26. <https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/DesarrolloEconomico/vol6num18/Revista de Desarrollo Econ%C3%B3mico V6 N18 3.pdf>
- CRT., Consejo Regulador del Tequila, 2020. Historia de la denominación de origen. CRT, pp. 1-3. <https://www.crt.org.mx/index.php/es/pages-3/otros-productos-vinculados-al-origen>
- CRT, Consejo Regulador del Tequila, 2022. Mapas Históricos. ART, pp. 1-3 <https://www.crt.org.mx/EstadisticasCRTweb/>
- C.R.T, Consejo Regulador del Tequila, 2024. Historia de la denominación de origen. pp. 1-3. <https://www.crt.org.mx/index.php/es/pages-3/otros-productos-vinculados-al-origen>
- Cruz, A., Rivero, D., Martínez, B., Echevarría, A., and Tania, A., 2017. Evaluación de la actividad antifúngica de *Trichoderma asperellum* Samuels ante patógenos fúngicos que afectan al cultivo de la soya (*Glycine max* L.). *Cultivos Tropicales*, 38, pp.15-21. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_artext&pid=S025859362017000400006&lng=es&tlng=es.
- Da Silva, M. C., Robert-Harri H., João, S. M., Pereira, A. and Adami, T. F., 2010. Diversidad e genética por marcadores moleculares em *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense no Estado de Santa Catarina. *Ciência Rural*
- Delgado, J.C., Ochoa, Y.M., Cerna, E., Beltrán, M., Rodríguez, R., Aguirre, L.A., and Vázquez, O., 2016. Patogenicidad de especies de *Fusarium* asociadas a la pudrición basal del ajo en el centro norte de México. *Revista Argentina de Microbiología*, 48, pp. 222-228. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2016.04.003>
- Dempsey, D.M.A. and Klessig, D.F., 2017. How does the multifaceted plant hormone salicylic acid combat disease in plants and are similar mechanisms utilized in humans? *Biomedical Center Biology*, 15, pp. 1-11. <https://doi.org/10.1186/s12915-017-0364-8>
- DOF, Diario Oficial de la Federación., 2013. ACUERDO por el que se establece la campaña y las medidas fitosanitarias que deberán aplicarse para el control y en su caso erradicación del picudo del agave, así como disminuir el daño de las enfermedades asociadas a dicha plaga en la Zona Denominación de Origen Tequila. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5284294&fecha=08/01/2013.
- DGSV-CNRF, Dirección General de Sanidad Vegetal-Centro Nacional de Referencia Fitosanitaria., 2017. Marchitez del Agave, *Fusarium oxysporum*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación-Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Alimentaria. Tecámac, México, pp.111. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/244026/Ficha_Tecnica_Fusarium_oxysporum_en_agave_Versi_n_FINAL.pdf
- Durrant, W.E. and Dong, X., 2004. Systemic acquired resistance. *Annual Review of Phytopathology*, 42, pp. 185-209. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.42.04.0803.140421>
- Flores, L.H.E., Chávez, D.A.A., Ruiz, C.J.A., Mora, O.C., and Rodríguez, M.V.M., 2016. Efecto del cambio climático sobre las zonas de riesgo por marchitez en el *Agave tequilana* Weber variedad Azul en Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13, pp. 2497-2510.
- Erazo, C.L.F., 2012. Diseño y construcción de un ozonificador con capacidad de 300 m³ para la purificación de ambientes. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. UTE, 1-144 p. <http://repositorio.ute.edu.ec/handle/123456789/19298>.
- Flores, L., H.E., Ireta, M.J. y Ruíz, C.J.A., 2010. Prevención y/o control de la marchitez del agave tequilero. Ficha de la Tecnología. INIFAP, pp. 1-2.
- Flores, H.E., Chávez, Á. A., Ruíz, J.A., De la Mora, C., and Rodríguez, V.M., 2016. Efecto del cambio climático sobre las zonas de riesgo por marchitez en el *Agave tequilana* Weber variedad Azul en Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13, pp. 2497-2510
- García, J.M., Alcañiz, S., Fernández, F.J., Pérez, J.J., Silveira, D., and García, M., 2020. Revisión de las aplicaciones del ozono y su generación para el uso en mascarillas contra Patógenos.

- Versión Preliminar. Grupo Unidad Científica de Innovación Ars Innovatio, Universidad de Alicante, España, pp. 1-14. <http://hdl.handle.net/10045/104988>.
- García, E.J., Méndez S.J., and Talavera., 2010. El género *Agave* spp. en México: Principales usos de importancia socioeconómica y agroecológica. *Revista Salud Pública y Nutrición*, 5, pp.109-129. http://www.geaac.org/images/stories/DM_GeneroAgaveSSP_130311.pdf
- García, A.J., 2018. México cuenta con 159 especies de agave; investigadores de la UNAM encontraron 4 nuevas. Universidad Nacional Autónoma de México, Boletín UNAM-DGCS-045, pp. 1-3. https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2018_045.html
- García, Y., Galindo, M.E., Murguía J., Landero, I., and Leyva, O.R., 2018. Fertilización complementada con sílice en la resistencia del tomate a *Fusarium oxysporum* Schtdl. *Agronomía Mesoamericana*, 29. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i1.27002>
- Goertz A.Z., Sebastian, M., Spiteller,, U., Steiner, H.W., Dehne, C., Waalwijk, C., de Vries, I., and Oerke, E. C., 2010. Fusarium species and mycotoxin profiles on commercial maize hybrids in Germany. *European Journal of Plant Pathology*, 128, pp.101-111. <https://core.ac.uk/download/pdf/29238725.pdf>
- Gómez, J.R., Villarreal, B.T., Vázquez, L.A, Arteaga, G.R.I., y Osuna, G.J.A., 2017. Actividad esporicida de la solución electrolizada con pH neutro en hongos de importancia postcosecha. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, Publicación Especial, 19. pp. 3993-4007. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i19.668>.
- Gómez, P., Sánchez, A., Virgen, G., Carvajal, C.R. and Padrón, E., 2011. Incidencia y severidad de la marchitez del *Agave tequilana* Weber Var. azul en la zona sur del Estado de Nayarit, México. *Revista Agraria Nueva Época*, 8, pp. 21-25. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/244026/Ficha_Tcnica_Fusarium_oxysporum_en_agave_Versi_n_FINAL.pdf
- González, T., Troncos, R., Gonzalez, D., and Mendez, V., 2022. Patogenicidad de las cepas nativas de *Fusarium solani* en plantas de algodón transgénico en Baja California, México. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 25, pp. 1-7. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.420>
- Gliessman, S., 2013. Agroecología: plantando las raíces de la resistencia. *Agroecología*, 8, pp.19-26.
- Harman, G., Howell, C., Viterbo, A. y Chet I- Lorito M., 2004. *Trichoderma* species opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature Reviews*, 2, pp. 43-56. <https://doi.org/10.1038/nrmicro797>
- Henao, E. D., Hernández, C.A., Salazar, C., Velasco, M.L., and Gómez, E.D., 2018. Identificación molecular de aislamientos de *Fusarium* asociados a maracuyá en el Valle del Cauca, Colombia 1 *Agronomía Mesoamericana*, 29. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43754020005>
- Hernández, R., López, A., Borreg, F., Espinoza, J., Sánchez, D., Maldonado, I.E. and López, L.A., 2014. Razas de *Fusarium oxysporum* f. sp. lycopersici en predios tomateros en San Luis Potosí. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5, pp. 1169-1178
- Horváth, E., Pál, M., Szalai, G., Páldi, E. and Janda, T., 2007. Exogenous 4-hydroxybenzoic acid and salicylic acid modulate the effect of short-term drought and freezing stress on wheat plants. *Biología Plantarum*, 51, pp. 480-487. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10535-007-0101-1.pdf>
- INEGI-CAJ, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática-Consejo Agroalimentario de Jalisco., 2019. Conociendo la industria del tequila y el mezcal. Comunicado de prensa, 342. pp. https://www.inegi.org.mx/contenidos/salade_prensa/boletines/2019/OtrTemEcon/industria_tequila.pdf
- Infante, M., Avilés, M., Borrero, C., Demetrio, W.C. and Dionísio, J.A., 2018. Earthworms and *Fusarium oxysporum*: effect on strawberry plant growth and production. *Semina: Ciências Agrárias*, 39, pp 1437-1446. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2018v39n4p1437>

- Kebede, H., Liu, X., Jin, J. and Xing, F., 2020. Current status of major mycotoxins contamination in food and feed in Africa. *Food Control*, 110, pp.69-75. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106975>
- Khan, M.I.R., Fatma, M., Per, T.S., Anjum, N.A. and Khan, N.A., 2015. Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. *Frontiers in Plant Science, Secc Plant Physiology*, 30, pp. 1-17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00462>.
- Lecomte, H., Alabouvette, C., Hermann, V., Robert, F., and Steinberg, C., 2016. Biological control of ornamental plant diseases caused by *Fusarium oxysporum*: A review. *Biological Control*, 101, pp.17-30.
- Leslie, F. John and Summerell A. Brett., 2006. The *Fusarium* laboratory manual. Ed. Blackwell. Australia.369 pp.
- Leyva, S.G., Vivas M.L., Héctor M., Espitia, E., Valadez, E., and Huerta, J., 2003. Diferenciación de aislamientos de *Fusarium graminearum* por patogenicidad y pcr. *Revista de Fitotecnia Mexicana*, 26, pp. 37-42.
- Logrieco, A.F., Mulè, G., Moretti, A., and Bottalico, A., 2002. Toxigenic *Fusarium* Species and Mycotoxins Associated with Maize Ear Rot in Europe. *European Journal of Plant Pathology*, 108, pp. 597-609. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1020679029993>
- López, V., Mora, G., Gutiérrez, M.A., Mendoza, C., Martínez- V.I., Coria- J.J., Acevedo G., and Santana, B., 2020. Morphological and molecular characterization of *Fusarium* spp. associated to the regional occurrence of wilt and dry bud rot in *Agave tequilana*. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 38. 1-28. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1911-4>
- López, G., Martínez, J., and Mayett, Y., 2014. Cadena de suministro del mezcal de Zacatecas, situación actual y perspectivas de desarrollo. *Contaduría y Administración*, 59, pp. 227-252. <https://www.elsevier.es/es-revista-contaduria-administracion-87-sumario-vol-59-num-S0186104214X71019>.
- Lustre, H., 2022. Los superpoderes de las plantas: los metabolitos secundarios en su adaptación y defensa. *Revista Digital Universtaria*, UNAM, 23, pp. 1-8. <https://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e2022.23.2.10>.
- Ma, L., J, Geiser, D.M., Proctor, R.H., Rooney, A.P., O'Donnell, K., Trail, F., Gardiner, M., Manners, J.M. and Kazan, K., 2013. *Fusarium* Pathogenomics. *Annual Review of Microbiology*, 67, pp. 367-399. <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-092412-155650>.
- Manayay, C.A.L., Córdova, L.M., García, J.W. and Vásquez, J. M., 2016. Efecto antagónico de una cepa de *Trichoderma* sp sobre *Fusarium* sp. En planta de tomate Río Grande (*Solanum lycopersicum*). *UCV-HACER Revista de Investigación y Cultura*, 5(1), pp. 64–68. <https://revistas.ucv.edu.pe/index.php/ucv-hacer/article/view/748>
- Martínez, E., Martínez, P., Guillén, D., Peña, G. and Hernández, V. M., 2015. Diversidad de *Fusarium* en las raíces de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en el estado de Morelos, México. *Revista Mexicana de Micología*, 42, pp. 33-43
- Martínez, A., Martínez, L.E., Nápoles, C.R., Sánchez, N.M., Ambríz, L., Guillén, S., and Lobit, P., 2019. Monocultivo y sistemas agresivos de manejo asociados a plagas y enfermedades en plantaciones de *Agave cupreata* en Michoacán. In: A. Martínez Palacios, J.L. Morales García and S. Guillén Rodríguez, eds. *Aspectos sobre el manejo y la conservación de Agaves mezcaleros en Michoacán*, Universidad Michoacana de Nicolás de Hidalgo-Universidad Nacional Autónoma de México. pp. 83-101.
- Maruri, I., Avilés, N.Y., Buchala, A., and Serrano, M., 2019. Intra and Extracellular Journey of the Phytohormone Salicylic Acid. *Frontiers in Plant Science*, 10, p.423. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00423>.
- Medentsev, A.G. y Akimenko, V.K., 1998. Naphthoquinone metabolites of the fungi, *Phytochemistry*: 47: 935–959.
- Mendoza, C., Mora, G., Coria, J.J., Santana, B., Acevedo, G., Martínez, V., Gutiérrez, M.A. and Rubio, R. 2021. *Fusarium* spp. y

- estimación de carga de inóculo asociados a hijuelos de *Agave tequilana* en diferentes niveles de inductividad epidémica regional. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 39, pp. 94-121.
<https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2006-8>.
- Michel, A.C., Otero, M.A., Rebolledo, O., Lezama, R. and Ochoa, M.E., 2005. Producción y efecto antagónico de quitinasas y glucanasas por *Trichoderma* spp. en la inhibición de *Fusarium subglutinans* y *Fusarium oxysporum* in vitro. *Revista Chapingo serie Horticultura*, 11, pp. 273-278.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60911213>
- Montes, R., 2009. Diversidad de compuestos químicos producidos por las plantas contra hongos fitopatógenos. *Revista Mexicana de Micología*, 29, pp. 73-82.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S018731802009000100010&script=sci_abstract&tlng=pt
- Myung-Ho, K., Jin-Woong, J. and Young-Je, Cho., 2004. Comparison of characteristics on electrolyzed water manufactured by various electrolytic factors. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 36, pp.416-422.
<https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200404637341573.pdf>
- Naivy, Y., Nava, M.A., Medina, J.L., Martínez, R.R., and Cristóbal, N., 2015. Agave biotechnology: an overview, *Critical Reviews in Biotechnology*, 35, pp. 546-559.
<https://doi.org/10.3109/07388551.2014.923813>
- Nuño, C.S., 2005. Control químico como alternativa para el manejo de marchitez en *Agave* (*Fusarium* sp. y *Erwinia* sp.). Centro Universitario de Ciencias Biológicas. División de Ciencias Agronómicas. Coordinación de Posgrado. U. de G., 82 p.
http://repositorio.cucba.udg.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5402/Nuno_Cuevas_Sergio.pdf?sequence=1
- Oliva, L.C., Velázquez, T., Sosa, R., Partida, L., Díaz, T., Arciniega, J., and López, C.A., 2017. Control de la fusariosis vascular del garbanzo (*Cicer arietinum* L.) por microorganismos nativos de Sinaloa, México. *Agrociencia*, 51, pp.683-695.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952017000600683&lng=es&tlng=es.
- Pérez, E., Chávez, M.C. y González, J.C., 2016. Revisión del agave y el mezcal. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18, pp. 148-164.
<http://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.49552>.
- Page, J.M., Joanne, E.M., Patrick, M.B., Boutronc, I., Hoffmann, C.T., Mulrowe, D.C., Shamseerf, L., Jennifer M., Tetzlaff, E.A. Akh, S.E., Brenna, R.C., Glanville J., Jeremy, M., Grimshaw, A.H., Manoj M., Lalum, T.L., Elizabeth, W., Lodero, E.M, McDonald S., Luke A., McGuinness, L.A., Stewart, J.T., Tricott A.C., Welchu, V.A., Whiting P., Moherw D., Yepes J.J, Urrutia, G., Romero, M., and Fernández, S.A., 2021. Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas., *Revista Española de Cardiología*, 74, pp.790-799.
<https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>
- Quiñones, E.E., Montoya, A.C., Rincón, G., and López, L., 2023. Inoculación de bulbilos de *Agave tequilana* con hongos micorrízicos arbusculares: efecto en el crecimiento y biocontrol contra *Fusarium oxysporum*. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 24, pp. 3043.
https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num1_art:3043
- Quiroga L.F., Ruiz, N., Muñoz, G., and Lozano, M.D., 2012. Microorganismos rizosféricos, potenciales antagonistas de *Fusarium* sp. causante de la pudrición radicular de maracuyá (*Passiflora edulis* Sims). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria
- Ramírez, M.J., Mancilla, N.A., Meza, L., Turincio, R., Guzmán de Peña D., and Avila, M.E., 2017. Epidemiology of *Fusarium* wilt in Agave tequilana Weber var. azul. *Plant Protection Science*, 53, pp. 144-152.
- Ramos, Q.F., Bautista, H.A. and Sotelo, N.H., 2017. Relación de la temperatura y humedad relativa con el brote del hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *vanillae*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8, pp. 713-720.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v8i3.44>.

- Rangel, S.G., Castro, M.E., Beltrán, P.E., Reyes, C.H. and García, P.E., 2010. El ácido salicílico y su participación en la resistencia a patógenos en plantas. *Biológicas*, 1, pp. 90-95. <https://www.exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Elacidosalic%C3%ADlicoyresistenciaenplantas.pdf>
- Retana, K., Ramírez, J.A., Castro, O., Blanco, M., 2018. Caracterización morfológica y molecular de *Fusarium oxysporum* F. SP. Apii asociado a la marchitez del apio en Costa Rica, *Agronomía Costarricense*, 42, pp. 115-126. <https://doi.org/10.15517/rac.v42i1.32199>
- Reyes, S.J., Lecona, C.A., Gutiérrez, F.A., Ruiz, V.M. and Vargas, A.A., 2021. Selection and analysis of polymorphisms in somaclonal variants of *Agave americana* resistant to *Fusarium oxysporum* via an ethyl methanesulphonate treatment. *Phyton-International Journal of Botany*, 90, pp. 1727-1739. <https://doi.org/10.32604/phyton.2021.016171>
- Riva, R.F.X., 2010. Análisis de la expresión del Gen PR-1 mediante la técnica de PCR en tiempo real (RT-PCK) en tomate (*Solanum Lycopersicum*) infectado con *Phytophthora infestans*. Tesis Ingeniería en Biotecnología. Departamento de Ciencias de la Vida, URI. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/2640>.
- Rivas, M., and Plascencia, J., 2011. Salicylic acid beyond defense: its role in plant growth and development. *Journal of Experimental Botany*, 62, pp. 3321-3338. <https://doi.org/10.1093/jxb/err031>
- Robles, M.L., Robles, C., Rivera, Fa., Ortega, M. P., and Pliego, L., 2013. Inoculación con consorcios nativos de hongos de micorriza arbuscular en *Agave angustifolia* Haw. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4, p.1231-1240. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200709342013001000014&lng=es&tlng=es.
- Robles, Y., Leyva M.L., Santos, G., Cruz, G.A., Camacho, T.M., Nieto, A.D. and Tovar, P.J.M., 2016. *Fusarium oxysporum* Schltdl. y *Fusarium solani* (Mart.) Sacc. causantes de la marchitez de plántulas de *Pinus* spp. en vivero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales.*, 7, pp 25-36. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63449186003>
- Rodríguez, G., Betancourt, I., Rodríguez, R., Velázquez, J.J., Fernández, S.P. and Gómez, N., 2012. Caracterización de Grupos de Compatibilidad Vegetativa de *Fusarium mexicanum* Causante de la Malformación del Mango en Jalisco, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 30, pp.28-140.
- Rodríguez, D., Hernández, D., Angulo, J.L., Rodríguez, R., Villarreal, J.A. and Lira, R.H., 2007. Antifungal activity in vitro of *Flourensia* spp. extracts on *Alternaria* sp., *Rhizoctonia solani*, and *Fusarium oxysporum*. *Industrial Crops and Products*, 25, pp. 111-116. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2006.08.007>
- Rodríguez, B., Gutiérrez, M., Arrizon, J., Loera, M.M., Flores, E.P., Rincón, G., Quiñones, E.E. and Quiñones, J.A., 2015. La materia prima: *Agave tequilana* Weber Var. Azul. Ciencia y tecnología del tequila: avances y perspectivas. 2 ed. Guadalajara, Jalisco, México: Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, pp. 17-53.
- Rodríguez, D. and Wang, A., 2020. Efectividad a nivel in vitro de *Trichoderma* spp. nativos e importados contra *Fusarium oxysporum*. *Agronomía Costarricense*, 44, pp. 109-125. <http://dx.doi.org/10.15517/rac.v44i2.43096>
- Rubio, R., 2007. Enfermedades del cultivo de agave. pp. 171-195. In: Pérez J.F., Del Real J.I. (eds). Conocimiento y prácticas agronómicas para la producción de *Agave tequilana* Weber en la zona de denominación de origen del tequila. Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro. Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jalisco. Libro Técnico Núm 4.
- Rubio, J.R., 2018. Análisis espacio-temporal de la marchitez del agave tequilero en Jalisco. Tesis de Maestría. Postgrado de Fitosanidad. Colegio de Postgraduados, pp. 33-34. <http://colposdigital.colpos.mx8080/jspui/handle/10521/30R>.

- Rudy, N., Hugh, S., Almanza, J.C. y Loza, M., 2011. Evaluación de la capacidad biocontroladora de cepas nativas de *Trichoderma* spp sobre *Rhizoctonia* sp y *Fusarium* sp en café (*Coffea arabica*) en condiciones experimentales, *Journal of the Selva Andina Research Society*, 2, pp. 43-52. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=361333623006>
- Samson R.A, Hoekstra, E.S., Frisvad, J.C. and Filtenborg, O., 1995. Introduction to Foodborne Fungi, fourth edition, CBS, Baarn, Netherlands, pp. 85-119.
- Serrano, H.A, and Cardona, N., 2015. Micotoxicosis y micotoxinas: generalidades y aspectos básicos. *CES Medicina*, 29. 143-151. <http://www.scielo.org.co/pdf/cesm/v29n1/v29n1a12.pdf>
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera., 2019. Recuperado de: <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>
- Sifontes, A.B., Melo, L., Maza, C., Mendes, J.J., Mediavilla, M., Brito, J.L., Zoltan, T., and Albornoz, A., 2010. Preparación de nanopartículas de plata en ausencia de polímeros estabilizantes. *Química Nova*, 33. pp. 1-11. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000600009>.
- Silva, C. M.; Hinz, R. H.; Stadnik, M. J.; Pereira, A., Adami, F., 2010. Diversidad genética por marcadores moleculares en *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense. *Ciencia Rural*, 40, pp. 2480-2485
- Summerell, B.A. and Leslie, J.F., 2011. Fifty years of *Fusarium*: How could nine species have ever been enough? *Fungal Diversity*, 50. pp. 135-144. <http://doi.org/10.1007/s13225-011-0132-y>
- Summerell, B.A., Salleh, B. and Leslie, J.F., 2003. An utilitarian approach to *Fusarium* Identification. *Plant Disease*, 87, pp. 117-128. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2003.87.2.117>.
- Tapia, C. and Amaro, J., 2014. Retrato microbiológico. *Revista Chilena de Infectología*, 31, pp. 1. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-10182014000100012>.
- Tlapal, B., González, H., Zavaleta, E., Sánchez, P., Mora, G., Nava, C., Del Real, J. I. and Rubio, R., 2014. Colonización de *Trichoderma* y *Bacillus* en plántulas de *Agave tequilana* Weber, Var. Azul y el efecto sobre la fisiología de la planta y densidad de *Fusarium*. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 32. pp. 62-72. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S018533092014000100006&script=sci_abstract&tlng=pt
- Trinidad, J.R., Quiñones, E.E., Rincón, G., López, L., and Hernández, L.V., 2017. Mycorrhization of *Agave cupreata*: Biocontrol of *Fusarium oxysporum* and plant growth promotion. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 35, pp. 151-169. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1607-5>
- Vásquez, D.A., Montes, R., Jiménez, A. and Flores, H.E., 2013. Aceites esenciales y extractos acuosos para el manejo *in vitro* de *Fusarium oxysporum* f. sp. lycopersici y *F. solani*. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 31, pp. 170-179.
- Villa, A., Pérez, R., Morales, H.A., Basurto, M., Sotelo, J.M. and Martínez, E., 2015. Situación actual en el control de *Fusarium* spp. y evaluación de la actividad antifúngica de extractos vegetales. *Acta Agronómica*, 64, pp. 194-205. <https://doi.org/10.15446/acag.v64n2.43358>.
- Vega, K.L., Uvalle, J.X. and Gómez, J.F., 2013. Molecular Variability among Isolates of *Fusarium oxysporum* associated with root rot disease of *Agave tequilana*. *Biochemistry Genetic*, 51, pp. 243-255. <https://doi.org/10.1007/s10528-012-9559-4>.
- Vlot, A.C., Dempsey, D.M.A. and Klessig, D.F., 2009. Salicylic acid, a multifaceted hormone to combat disease. *Annual Review of Phytopathology*, 47, pp. 177-206. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.050908.135202>
- Wagacha, J.M. and Muthomi, J.W., 2007. *Fusarium culmorum*: Infection process, mechanisms of mycotoxin production and their role in pathogenesis in wheat. *Crop Protection*, 26, pp. 877-885. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2006.09.003>

- Wulff, E.G., Sørensen, J.S., Lübeck, M., Nielsen, K.F., Thrane, U.T.J., 2010. *Fusarium* spp. associated with rice Bakanae: ecology, genetic diversity, pathogenicity and toxigenicity. *Environmental Microbiology*, 12, pp. 649–657. <http://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2009.02105.x>
- Yamaki, Y. and Schörner, A., 1995. A field trial for estimating possibility of controlling powdery mildew of *Cucumber* by function water. University Orchard, Faculty of Agriculture, University of Tokyo. In: Function Water Symposium Held in Kyoto in 1995. Vision for the future of acid and alkaline electrolytic water DRAFT, pp. 1-20. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10016874805/>
- Yahuza, I. 2011. Review of some methods of calculating intercrop efficiencies with particular reference to the estimates of intercrop benefits in wheat/faba bean system. *International Journal of Biosciences*, 5, pp. 18-30.
- Yogalakshmi, S., Thiruvudainambi, S., Kalpana, K., Thamizh, V.R. and Oviya, R., 2021. Antifungal activity of *Trichoderma atroviride* against *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici* causing wilt disease of tomato. *Journal of Horticultural Sciences*, 16, <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=577074107015>
- Yuan, S., Lin, H.H., 2008. Minireview: Role of salicylic acid in plant abiotic stress. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 63, pp. 313-320. <https://doi.org/10.1515/znc-2008-5-601>.
- Zhao, T., Gao, F., Zhou, L. and Song, T., 2013. Essential oil from *Inula britannica* extraction with SF-CO₂ and its antifungal activity. *Journal of Integrative Agriculture*, 12, pp. 1791-1798. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60382-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60382-2)