



Poblaciones microbianas y su contribución en la generación de suelos supresivos

Microbial populations and their contribution to suppressive soils generation.

Guadalupe C. Barrera-Galicia¹ ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7056-271X>
Juan Armando Flores de la Torre¹ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4660-5641>
Mónica Imelda Martínez-Acuña² ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6084-5986>
Jaime Cardoso-Ortiz¹ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2644-6540>
Sergio A. Covarrubias^{2*} ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4530-3067>

1. Laboratorio de Toxicología Ambiental. Unidad Académica de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas 98000, México.
 2. Laboratorio de Epidemiología Ambiental. Unidad Académica de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas 98000, México.
- ***Autor correspondiente:** sergio.hernandez@uaz.edu.mx

Recibido: 25 abril 2024 **Aprobado:** 24 agosto 2024 **Publicado:** 31 agosto 2024

RESUMEN

En los agroecosistemas, el suelo es esencial para todos los cultivos, siendo el principal soporte de las raíces y la fuente de nutrientes para las plantas. El suelo es además el hábitat de microorganismos que pueden llegar a tener efectos tanto benéficos como perjudiciales para las plantas. Los suelos supresivos (SS) son quizás el mejor ejemplo para describir la compleja interacción entre las plantas y su microbioma. En un SS la incidencia y severidad de las infecciones permanecen bajas aun en las condiciones adecuadas para su desarrollo. Existen dos tipos de supresión en los SS: general, donde toda la comunidad microbiana actúa en conjunto, y específica, donde ciertos taxones microbianos o grupos antagonistas dirigen la supresión. El efecto antagonístico de los SS se debe a los diversos mecanismos como: la competencia por nutrientes, producción de compuestos antimicrobianos, compuestos orgánicos volátiles (VOCs) e inducción de resistencia sistémica. En las últimas décadas,

gracias a las tecnologías ómicas, la naturaleza microbiana de la supresión ha sido ampliamente demostrada. Sin embargo, potenciar la formación de suelos supresivos sigue representando un reto en términos del manejo sustentable de dicho recurso natural. Por ello, en la presente revisión se busca brindar un panorama actual sobre el papel de las comunidades microbianas en la formación de suelos supresivos.

Palabras clave: microbioma, fitopatógenos, biocontrol.

ABSTRACT

Soil is an essential resource in agroecosystems because it supports plant roots and provides nutrients for their growth. Soil is also the habitat of microorganisms that can have both beneficial and harmful effects on plants. Suppressive soils (SS) are perhaps the best example to describe the complex interaction between plants and their microbiome. In SS, the occurrence and





severity of an infections remain low even under suitable conditions for their development. There are two types of suppression in SS: general suppression, which involves the collective action of the entire microbial community, and specific suppression, where certain microbial taxa or antagonistic groups are responsible for the suppression. The antagonistic effect of SS is due to several mechanisms such as: competition for nutrients, production of antimicrobial compounds, volatile organic compounds (VOCs), and induction of systemic resistance. In recent decades, thanks to omics technologies, the microbial nature of suppression has been widely demonstrated. However, enhancing the formation of suppressive soils remains a challenge in terms of sustainable management. This review aims to provide an updated overview of the role of microbial communities in the formation of suppressive soils.

Keywords: microbiome, phytopathogen, biocontrol.

INTRODUCCIÓN

El suelo es considerado un recurso natural dinámico, cuya condición es determinante para sustentar la vida en la tierra (Voroney y Heck, 2015). Dicho recurso está estrechamente relacionado con la salud humana, la calidad del agua, el balance en los ecosistemas y la seguridad alimentaria (Fierer *et al.*, 2021). Para ello, el suelo debe mantener de forma óptima al menos cuatro de sus funciones principales: i) transformación del carbono; ii) ciclaje de nutrientes; iii) estructura y soporte para las plantas y iv) regulación de plagas y enfermedades (Kibblewhite *et al.*, 2008).

De los diferentes tipos de microorganismos (bacterias, hongos, oomicetos y nemátodos) que habitan en el suelo, los denominados microorganismos patógenos del suelo (MPS) son de especial interés, ya que son capaces de infectar plantas y causar enfermedades de importancia económica en cultivos agrícolas. Los MPS requieren un hospedero susceptible para desarrollar su fase parasítica; sin embargo,

pueden persistir (durante algunos días e inclusive años) en forma saprofitica sobre residuos o en estructuras de dormancia (p.ej. oosporas, clamidosporas y esclerocios) características de cada género (De Coninck *et al.*, 2015; Lucas, 2006).

Dentro de los MPS los hongos y oomicetos son los más difíciles de controlar, limitando significativamente la productividad agrícola (Jayaraman *et al.*, 2021). Entre los principales agentes causales de enfermedades se encuentran distintas especies de los géneros *Fusarium* spp., *Verticillium* spp., *Phytophthora* spp., *Pythium* spp. y especies como *Rhizoctonia solani* y *Gaeumannomyces graminis*, las cuales provocan las mayores pérdidas de rendimiento y calidad en la producción de alimentos. Los cultivos más afectados por las infecciones fúngicas son las leguminosas y los cereales (Mahmoud, 2022). Se estima que las pérdidas por enfermedades causadas por hongos alcanzan hasta 78%, siendo *F. graminearum*, *Magnaporthe oryzae*, y *Bipolaris sorokiniana* las especies de mayor importancia en los cultivos antes mencionados (Du *et al.*, 2022).

De forma generalizada, el manejo de los hongos fitopatógenos consiste en la aplicación de agentes químicos como los son el bromuro de metilo, 1,3-dicloropropeno, cloropicrina, metalaxil y mefenoxam (De Corato, 2019). Sin embargo, el uso prolongado y excesivo de dichos compuestos ocasiona efectos adversos en el suelo, entre los que destacan: i) acidificación y salinización, ii) contaminación, iii) disminución del contenido de materia orgánica y iv) pérdida de la diversidad genética (Kopittke *et al.*, 2019). Por ello, en el contexto de un manejo agrícola sustentable, cada vez se aplican con más frecuencia estrategias encaminadas a disminuir el impacto negativo de dichos compuestos.

Desde el siglo pasado se ha postulado que muchas especies de plantas han desarrollado estrategias de defensa contra microorganismos patógenos. Éstas involucran la estimulación y el soporte selectivo de poblaciones de microorganismos antagonistas (Weller *et al.*, 2002).





El mejor ejemplo de protección de las plantas mediada por microorganismos, contra el ataque de MPS, son los denominados suelos supresivos. La presente revisión tiene como objetivo describir los mecanismos de acción y los grupos microbianos involucrados en la supresión de enfermedades, presentar el avance de las investigaciones actuales y las técnicas utilizadas para estudiar dicho fenómeno.

Suelos supresivos

Un suelo supresivo (SS) se define como “aquel suelo donde el desarrollo de una enfermedad se presenta en un nivel mínimo, aun en presencia de un patógeno virulento y un hospedero susceptible” (Cook, 2014; Jayaraman *et al.*, 2021). En contraste, a los suelos donde las enfermedades se desarrollan fácilmente, se les denomina conductivos. Los SS fueron descritos por primera vez por Atkinson en 1892. Desde entonces, en todo el mundo, se ha reportado la existencia de suelos supresivos para una amplia variedad de microorganismos fitopatógenos, que incluyen: nemátodos como *Heterodera* spp., distintas especies de hongos como *G. graminis* var *tritici*, *F. oxysporum*, *F. solani*, *F. pseudograminearum*, *Verticillium dahliae*, *Pyrenochaeta lycopersici*, *Sclerotinia sclerotiorum*, *Alternaria triticina*, *Plasmidiophora brassicae*, *Pythium* spp. y *R. solani*, así como bacterias de distintas especies entre las que destacan *Streptomyces scabies*, *Ralstonia solanacearum* y *Agrobacterium radiobacter* var *tumefaciens* (Liu *et al.*, 2021; Gómez Expósito *et al.*, 2017; Mazzola, 2002). Dada la gran diversidad de fitopatógenos controlados por los SS se puede inferir que este fenómeno es común en la naturaleza, inclusive en los sistemas intervenidos por el hombre como los son los agroecosistemas.

Tipos de supresión

De forma natural, todos los suelos poseen cierta capacidad para inducir supresión de fitopatógenos, se ha demostrado que dicha capacidad está asociada a la presencia y actividad de los microorganismos del suelo. En

los SS se pueden presentar dos tipos de supresión: i) supresión general, atribuida a la actuación de la comunidad microbiana en conjunto, comúnmente asociada a la competencia por recursos y espacio, y ii) supresión específica, la cual se lleva a cabo por la actividad de taxones microbianos determinados o un grupo selecto de microorganismos antagonistas a un patógeno específico (Gómez Expósito *et al.*, 2017; Weller *et al.*, 2002).

La supresión específica ha sido objeto de mayor interés dado que aunado a su alta efectividad, posee un enorme potencial de aplicación. Lo anterior debido a que, en contraste con la supresión general, la supresión específica puede ser transferida a un suelo conductivo. Al respecto, Mendes *et al.*, (2011), observaron la reducción significativa de la infección de plantas de betabel con *R. solani* al transferir una pequeña porción de un SS (10 %), dentro de un suelo conductivo. Existen además en todo el mundo numerosos ejemplos en los cuales una sola especie microbiana antagonista puede iniciar procesos supresivos. En Australia, se ha observado durante 40 años que existe una correlación entre la disminución de la incidencia de la agalla de la corona (*Agrobacterium tumefaciens*) y el aumento de la población de la especie *A. radiobacter* (no patógena) en almendros (Schlatter, *et al.*, 2017). Aunado a lo anterior, se ha demostrado que la supresión específica de algunos hongos fitopatógenos es inducida por un brote infeccioso que regularmente sucede después del cultivo continuo de un hospedero susceptible (Raaijmakers y Mazzola, 2016). El ejemplo mejor caracterizado de este fenómeno es el de la reducción espontánea del “Take all”, enfermedad del trigo causada por *G. graminis* var *tritici*. Durante las etapas iniciales de monocultivo de trigo, la incidencia de la infección se incrementa; sin embargo, se ha observado que la severidad disminuye de forma espontánea y la supresión permanece hasta que se interrumpe el monocultivo (Mazzola, 2007). Dicho fenómeno, conocido como TDA (por sus siglas en inglés) está relacionado con la





producción de 2,4-diacilfluoroglucinol por *Pseudomonas* spp. (Döring *et al.*, 2020; Kwak y Weller, 2013; Schlatter, Daniel *et al.*, 2017).

Las bases microbianas de la supresión

Se ha descrito ampliamente que la supresión es un fenómeno multifactorial y complejo, lo anterior debido a que existen características fisicoquímicas del suelo que desempeñan un papel importante en la composición y la actividad de las comunidades microbianas. Utilizando el patosistema *Pythium ultimum* – *Lepidium sativum*, Bongiorno *et al.*, (2019) evaluaron durante un promedio de 19 años la actividad supresiva del suelo en diez parcelas con prácticas agronómicas y características contrastantes. En dicho estudio los autores concluyeron que ni la materia orgánica (MO) total, ni la relación C/N, son determinantes en la supresión de *P. ultimum*. Mientras que la calidad de la MO y varias fracciones biodisponibles del carbono, presentaron una relación directa con la actividad supresiva del suelo. Lo cual se debe a que el carbono biodisponible es considerado la primera fuente de energía para los microorganismos, favoreciendo así el soporte selectivo de la comunidad microbiana que compite contra los MPS. Aunado a lo anterior, recientemente se ha descrito como la relación del carbono biodisponible y el incremento de la biomasa microbiana en la superficie del suelo favorecen la supresión de *Fusarium culmorum* (Palojärvi *et al.*, 2020).

La actividad y composición del microbioma rizosférico son influenciadas también por la planta a través de la producción de exudados radiculares, los cuales promueven la incorporación, activación y desarrollo de microorganismos benéficos para protegerse del ataque de MPS. Al respecto, en un análisis metagenómico de la rizósfera del betabel cultivado en un SS a *R. solani*, se demostró que la invasión de la rizósfera por el patógeno aumenta significativamente la población de bacterias de familias específicas como *Oxalobacteraceae*, *Burkholderiaceae*, *Sphingobacteriaceae* y *Sphingomonadaceae*

(Chapelle *et al.*, 2016). De igual manera, Siegel-Hertz *et al.*, (2018) compararon la diversidad microbiana entre un SS y un suelo conductivo a la marchitez (*F. oxysporum* f. sp. *lini*) de la linaza. La comparación entre ambos suelos, basada en la composición global de unidades taxonómicas operacionales (OTU, por sus siglas en inglés), mostró una mayor diversidad en el SS a *F. oxysporum*. Respecto a la asignación taxonómica, se encontraron géneros fúngicos (*Acremonium*, *Chaetomium*, *Clonostachys*, *Fusarium* y *Penicillium*) y bacterianos (*Adhaeribacter*, *Amycolatopsis*, *Arthrobacter*, *Paenibacillus*, *Rhizobacter*, *Rubrobacter*, y *Stenotrophomonas*) descritos previamente como antagonistas a una gran diversidad de patógenos. Aun cuando no se determinó la actividad específica de alguno de estos géneros, los autores refieren que existe una correlación entre el aumento de estas poblaciones y la supresión de la infección. La supresión de la incidencia y severidad de una infección puede ocurrir ya sea de forma directa a través de la competencia y/o antibiosis, o indirectamente mediante la inducción de mecanismos de defensa de la planta (Carrión *et al.*, 2018; Garbeva *et al.*, 2004; Steinberg *et al.*, 2019).

Competencia

Debido a la baja disponibilidad de hierro, en la mayoría de los suelos la competencia por este elemento a través de la producción de sideróforos puede modular la supresión de patógenos. En ese sentido, Gu *et al.*, (2020) determinaron que la inoculación de tomate con un consorcio microbiano formado por 5 cepas productoras de sideróforos (*Ralstonia mannitolilytica* QL-A2, *R. mannitolilytica* QL-A3, *R. pickettii* QL-A6, *R. taiwanensis* QL-117, y *R. pickettii* QL-140) reducen hasta en un 60% la incidencia de la enfermedad ocasionada por *R. solanacearum*, asociando dicho fenómeno a la competencia directa por hierro en un ambiente limitante. Los autores sugieren que la estrecha cercanía filogenética aunada a la competencia por nichos ecológicos comunes





resulta en la producción de sideróforos especie-específicos.

Producción de compuestos antimicrobianos

En este contexto se hace referencia al mecanismo por el cual los microorganismos liberan al medio metabolitos que son capaces de controlar a los MPS y las enfermedades que causan en las plantas. Durante el último cuarto de siglo se ha demostrado de forma contundente que además de los sideróforos (ver sección 4.1), otros metabolitos (p. ej. antibióticos, compuestos orgánicos volátiles y enzimas líticas) desempeñan un papel fundamental en la supresión de MPS de varias plantas. Las herramientas ómicas en conjunto con las técnicas de microbiología clásica y la biología molecular, han permitido comenzar a elucidar la complejidad de las interacciones planta-microorganismo (Carrión *et al.*, 2018).

Antibióticos

Varios estudios han demostrado que los antibióticos producidos por bacterias poseen un amplio espectro de actividad antagónica (Raaijmakers *et al.*, 2002). Se ha demostrado que la inoculación de suelo con la cepa *Pseudomonas* sp. LBUM223, productora de ácido fenazina-1-carboxílico (PCA), reduce significativamente los síntomas de la roña de la papa, causada por *Streptomyces scabies*. El papel del PCA en la supresión de la infección está relacionado con el efecto que tiene el antibiótico sobre la producción de taxtomina B, uno de los factores de virulencia de *S. scabies* (Arseneault *et al.*, 2013; Arseneault y Filion, 2017). De forma similar, *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *Aurantiaca* Pcho10 controla el tizón del trigo causado por *F. graminearum* (Hu *et al.*, 2014). Otro metabolito bacteriano, la pirrolnitrina producida por *Pseudomonas fluorescens*, ha mostrado ser efectiva contra hongos de importancia económica como *R. solani*, *Botrytis cinerea*, *V. dahliae*, y *S. sclerotiorum* (Raaijmakers *et al.*, 2002).

Compuestos orgánicos volátiles

Los compuestos orgánicos volátiles (VOCs), emitidos por los microorganismos del suelo, llevan a cabo una importante función en los ecosistemas terrestres. En ensayos *in vitro*, se ha demostrado ampliamente que los VOCs inhiben el crecimiento de fitopatógenos como: *Phytophthora infestans*, *R. solani*, *S. sclerotiorum*, *F. oxysporum*, *Verticillium longisporum*, *V. dahliae*, *Pythium ultimum*, *Colletotrichum acutatum*, *B. cinerea*, y *Penicillium expansum* (Rana *et al.*, 2024). Un estudio realizado por (Mitchell *et al.*, 2010) demostró que la mezcla de compuestos producidos por el hongo endófito de la piña, *Muscodor crispans*, posee actividad antibiótica contra un amplio rango de fitopatógenos como: los hongos *P. ultimum*, *Phytophthora cinnamomi*, *S. sclerotiorum* y *Mycosphaerella fijiensis*, y bacterias que afectan severamente los cítricos como *Xanthomonas axonopodis* pv. *citri*. Sin embargo, debido a la complejidad de los suelos, existen pocos reportes sobre la supresión *in vivo* de una infección asociada directamente a la producción de VOCs. Por ejemplo, durante la última década, científicos del Instituto holandés de Ecología (NIOO-KNAW), han realizado una minuciosa caracterización de un SS a la marchitez del betabel ocasionada por *R. solani*. Dicho grupo de trabajo ha podido determinar que, a diferencia de los suelos conductivos, en los suelos supresivos al patógeno, las β -proteobacterias, en especial las del grupo bacteriano *Burkholderia* sensu lato, representan la población mayoritaria del suelo (Carrión *et al.*, 2018; Chapelle *et al.*, 2016; Mendes *et al.*, 2011). De forma específica, bioensayos realizados en microcosmos de suelo, mostraron que la inoculación directa de *Paraburkholderia graminis* PHS1, reduce significativamente la severidad de la infección. Además, se encontró que la actividad antagónica de *P. graminis* PHS1 está relacionada con la producción de compuestos volátiles azufrados. La mutagénesis dirigida de los genes que codifican para la producción de este tipo de compuestos (dimetilsulfóxido reductasa y cisteína desulfurasa) provocó la pérdida de la actividad





inhibitoria *in vitro* e *in situ* (Carrión *et al.*, 2018).

Inducción de resistencia sistémica

Una forma indirecta para suprimir la incidencia de una enfermedad es a través del incremento del nivel de resistencia sistémica (ISR) basal de las plantas. De forma natural, las plantas poseen sistemas de defensa que se expresan activamente en respuesta al estrés biótico. Generalmente dicha respuesta consiste en una cascada de señalización dependiente del ácido salicílico que puede provocar i) cambios en la composición de la pared celular (p. ej. deposiciones de callosa), ii) producción de *novo* de proteínas-relacionadas con la patogénesis como glucanasas y iii) producción de fitoalexinas (Heil y Bostock, 2002). Sin embargo, existe una extensa cantidad de compuesto involucrados en este mecanismo de defensa que siguen en proceso de investigación. Se han publicado innumerables trabajos describiendo el papel que juega el microbioma del suelo en la inducción de resistencia para la supresión de infecciones (Choudhary *et al.*, 2007; Choudhary y Johri, 2009). Existe una importante y creciente lista de agentes bióticos involucrados en la ISR, como bacterias (*Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp., *Serratia* spp.); hongos (*Trichoderma* spp., *Piriformospora indica*, *Penicillium simplicissimum*, *Phoma* sp. y especies no patógenas del género *Fusarium*) así como hongos micorrícicos arbusculares (Bakker *et al.*, 2013). Estudios recientes, como el realizado por Chialva *et al.*, (2018), han demostrado que el microbioma de suelo modula los mecanismos involucrados en la respuesta a estrés oxidativo, biosíntesis de compuestos fenólicos, la deposición de lignina y la inmunidad innata de plantas de tomate expuestas a *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici*. Así mismo, Wen *et al.*, (2023) determinaron que la disminución gradual de los síntomas de la marchitez del pepino, causada por *Fusarium*, sucedía a la par de una acumulación significativa de especies reactivas de oxígeno en las raíces y el aumento la

población de bacterias de los géneros *Bacillus* y *Sphingomonas*.

Estrategias de manejo agronómico en la generación de suelos supresivos

Desde hace mucho tiempo, alrededor del mundo se ha reportado la presencia de suelos supresivos a patógenos específicos. Al respecto, la presencia de SS ha sido registrada en Morens, Suiza contra *Berkeleyomyces basicola*, responsable de la pudrición negra de la raíz del tabaco; en el valle de Salinas (California) y Châteaurenard al sur de Francia ambos en contra de enfermedades ocasionadas por especies del género *Fusarium*; así como en la región de Vysočina en Republica Checa contra bacterias del género *Streptomyces* causante de la costra negra de la papa (Sagova-Mareckova *et al.*, 2023, Kopecky *et al.*, 2019, Alabouvette *et al.*, 1985).

Aunque la supresión es un fenómeno ocasionado por la comunidad microbiana nativa del suelo y ocurre a través de los mecanismos descritos anteriormente (ver sección 4), se han realizado esfuerzos para determinar los factores que pueden influir en el reclutamiento de los microorganismos antagónicos responsables de la supresión. Al respecto Sagova-Mareckova *et al.*, (2023) distinguen entre los factores a largo plazo, a los cuales les atribuye una supresión duradera y de carácter específico como es el caso de los ejemplos citados anteriormente. Estos factores son considerados “naturales” ya que son característicos de cada sitio y no pueden ser modificados tan fácilmente por el hombre como; el origen geológico del suelo, la acumulación de material erosionado, los restos de organismos, el clima y las zonas de vegetación. Mientras que los factores susceptibles a ser modificados por el hombre los denomina manipulaciones a corto plazo, siendo las principales la aplicación de enmiendas orgánicas, inoculación de bacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR), la rotación de cultivos y en menor medida procesos de aireación, labranza y acidificación del suelo. Los cuales en su conjunto han demostrado





mayor eficacia para producir supresiones temporales de carácter general.

Al respecto, a pesar de que las enmiendas orgánicas (p. ej. compostas, vermicompostas y estiércol) son utilizadas principalmente como aporte nutricional para la planta, investigaciones recientes han demostrado su efecto en la generación de suelos supresivos (Yadav *et al.*, 2015). Compostas provenientes de biosólidos municipales mostraron ser efectivas contra *Fusarium oxysporum* en plantas de tomate, debido a la producción de exudados radicales los cuales disminuyeron la germinación de los microconidios (Akhter *et al.*, 2015). De igual manera, compostas provenientes de residuos agrícolas redujeron en 2.5 veces el índice de severidad de la marchitez de la papa, comparada con los tratamientos sin aplicación de composta (Mengesha *et al.*, 2017).

Generalmente las compostas se encuentran libres de patógenos debido a las altas temperaturas que alcanza durante su etapa termofílica, sin embargo, los microorganismos benéficos no están exentos de este efecto, por lo cual también resultan inactivados durante el proceso. Lo anterior significa que la habilidad de suprimir patógenos y enfermedades depende del periodo de maduración, donde una nueva microbiota benéfica recoloniza la composta (De Corato, 2020., Noble y Roberts, 2004). Esta actividad puede ser beneficiada por la inoculación de PGPRs, inoculantes bacterianos de los géneros *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Streptomyces* son los más utilizados para este fin al igual que hongos del género *Trichoderma* (Rudrappa *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2022 y Mukherjee *et al.*, 2022.) La aplicación de compostas al suelo no solo altera su composición biológica (microorganismos), también modifica sus características fisicoquímicas. En combinación, ambos factores generan la disminución de la incidencia y severidad de infecciones ocasionadas por MPS (De Corato, 2020).

Otra opción para el manejo de MPS es el uso de tés de compostas (TC). Los cuales consisten en

extractos acuosos de residuos compostados que pueden ser generados a través de un proceso de aireación (tés de composta aireados) o de forma anaeróbica (tés de compostas no-aireados). La extracción de los compuestos solubles y los microorganismos benéficos presentes en la composta, permiten a la planta absorber nutrientes y favorecer el crecimiento de microorganismos antagonicos (St. Martin, 2014). Desde hace más de dos décadas se ha estudiado el efecto supresor de los TC sobre hongos fitopatógenos como: *P. ultimum*, *F. oxysporum*, *V. dahliae* y *R. solani* (Scheuerell y Mahaffee, 2002; Alfano *et al.*, 2011). En trabajos recientes como el publicado por González-Hernández *et al.*, (2021), se analizó el efecto de los TC aireados en la supresión de *R. solani* y *P. capsici*, encontrando una reducción de hasta 38% en el crecimiento de estos patógenos en ensayos *in vitro*. Asimismo, al evaluar el efecto directo del TC en plantas inoculadas con los patógenos, se observó una disminución significativa en la severidad de los síntomas, lo cual fue atribuido a la comunidad microbiana presente en el TC.

CONCLUSIONES

La supresión natural es un fenómeno complejo, que se origina por la actividad ecológica y metabólica de diversas poblaciones microbianas o agentes supresores específicos. Los SS representan una estrategia eficaz y sostenible para controlar enfermedades en los cultivos agrícolas al aprovechar la capacidad intrínseca de la comunidad microbiana. Sin embargo, a pesar del potencial de los SS para el manejo de enfermedades en sistemas agrícolas, su promoción y aplicación efectiva requieren un enfoque multidisciplinario. Estrategias como la adición de enmiendas orgánicas y la inoculación selectiva con microorganismos benéficos, representan vías prometedoras para fomentar la formación de suelos supresivos. No obstante, persisten retos en términos de escalabilidad, especificidad de la supresión y evaluación de su impacto a largo plazo. Estas investigaciones ofrecen una perspectiva prometedora para el manejo integrado de





enfermedades en la agricultura, siendo el principal objetivo poder predecir las fluctuaciones en las comunidades microbianas asociadas con el cambio entre el estado supresivo y conductivo de un suelo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

Contribución de los autores

Conceptualización del trabajo, GCBG y SAC; investigación, escritura, revisión y edición, GCBG, SAC, JCO, MIMA y JAFT; financiamiento, JAFT y SAC.; supervisión, SAC.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd-Elmonsef Mahmoud, G. (2021). Biotic stress to legumes: fungal diseases as major biotic stress factor. En *Sustainable Agriculture Reviews 51: Legume Agriculture and Biotechnology* (Vol. 51, pp. 181-212). Springer Nature Switzerland AG. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68828-8_7
- Alabouvette, C., Couteaudier, Y., Louvet, J., Bremeersch, P., Richard, P., and Soulas, M. L. (1985). Recherches sur la resistance des sols aux maladies. XI. Etude comparative du comportement des *Fusarium* spp. dans un sol résistant et un sol sensible aux fusarioses vasculaires enrichis en glucose. *Agronomie*, 5, 63-68. <http://doi: 10.1051/ agro:19850109>
- Alfano, G., Lustrato, G., Lima, G., Vitullo, D., Ranalli G. (2011). Characterization of composted olive mill wastes to predict potential plant disease suppressiveness. *Biological control*, 58(3), 199-207
- Arseneault, T., and Filion, M. (2017). Biocontrol through antibiosis: Exploring the role played by subinhibitory concentrations of antibiotics in soil and their impact on plant pathogens. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 39(3), 267-274. <https://doi.org/10.1080/07060661.2017.1354335>
- Arseneault, T., Goyer, C., and Filion, M. (2013). Phenazine production by *Pseudomonas* sp. LBUM223 contributes to the biological control of potato common Scab. *Phytopathology*, 103(10), 995-1000. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-01-13-0022-R>
- Akhter, A., Hage-Ahmed, K., Soja, G., and Steinkellner, S. (2015). Compost and biochar alter mycorrhization, tomato root exudation and development of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. *Frontiers in Plant Science*, 6(529), 1-13. <http://doi:10.3389/fpls.2015.00529>
- Bakker, P. A. H. M., Doornbos, R. F., Zamioudis, C., Berendsen, R. L., and Pieterse, C. M. J. (2013). Induced systemic resistance and the rhizosphere microbiome. *The Plant Pathology Journal*, 29(2), 136-143. <https://doi.org/10.5423/PPJ.SI.07.2012.0111>
- Bongiorno, G., Postma, J., Bünemann E. K., Brussaard, L., de Goede R. G. M., Mäder, P., Tamm, L., Thuerig, B. (2019). Soil Suppressiveness to *Pythium ultimum* in ten European long-term field experiments and its relation with soil parameters. *Soil Biology and Biochemistry*, 133, 147-187. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.03.012>
- Carrión, V. J., Cordovez, V., Tyc, O., Etalo, D. W., de Bruijn, I., de Jager, V. C. L., Medema, M. H., Eberl, L., and Raaijmakers, J. M. (2018). Involvement of *Burkholderiaceae* and sulfurous volatiles in disease-suppressive soils. *The ISME Journal*, 12(9), 2307-2321. <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0186-x>
- Chapelle, E., Mendes, R., Bakker, P. A. H. M., and Raaijmakers, J. M. (2016). Fungal





- invasion of the rhizosphere microbiome. *The ISME Journal*, 10(1), 265-268. <https://doi.org/10.1038/ismej.2015.82>
- Chialva, M., Salvioli di Fossalunga, A., Daghino, S., Ghignone, S., Bagnaresi, P., Chiapello, M., Novero, M., Spadaro, D., Perotto, S., and Bonfante, P. (2018). Native soils with their microbiotas elicit a state of alert in tomato plants. *New Phytologist*, 220(4), 1296-1308. <https://doi.org/10.1111/nph.15014>
- Choudhary, D. K., and Johri, B. N. (2009). Interactions of *Bacillus* spp. and plants – with special reference to induced systemic resistance (ISR). *Microbiological Research*, 164(5), 493-513. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2008.08.007>
- Choudhary, D. K., Prakash, A., and Johri, B. N. (2007). Induced systemic resistance (ISR) in plants: Mechanism of action. *Indian Journal of Microbiology*, 47(4), 289-297. <https://doi.org/10.1007/s12088-007-0054-2>
- Cook, R. J. (2014). Plant health management: pathogen suppressive soils. En *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems* (pp. 441-455). Elsevier, London, UK. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00182-0>
- De Coninck, B., Timmermans, P., Vos, C., Cammue, B. P. A., and Kazan, K. (2015). What lies beneath: Belowground defense strategies in plants. *Trends in Plant Science*, 20(2), 91-101. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.09.007>
- De Corato, U. (2019). Use of omic approaches for characterizing microbiota from suppressive compost to control soil-borne plant pathogens. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 52(7-8), 757-775. <https://doi.org/10.1080/03235408.2018.1554199>
- Döring, T. F., Rosslenbroich, D., Giese, C., Athmann, M., Watson, C., Vágó, I., Kátai, J., Tállai, M., and Bruns, C. (2020). Disease suppressive soils vary in resilience to stress. *Applied Soil Ecology*, 149(103482), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103482>
- Du, S., Trivedi, P., Wei, Z., Feng, J., Hu, H.-W., Bi, L., Huang, Q., and Liu, Y.-R. (2022). The proportion of soil-borne fungal pathogens increases with elevated organic carbon in agricultural soils. *mSystems*, 7(2), e01337-21. <https://doi.org/10.1128/msystems.01337-21>
- Fierer, N., Wood, S. A., and Bueno de Mesquita, C. P. (2021). How microbes can, and cannot, be used to assess soil health. *Soil Biology and Biochemistry*, 153(108111). <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108111>
- Garbeva, P., van Veen, J. A., and van Elsas, J. D. (2004). Microbial diversity in soil: selection of microbial populations by plant and soil type and implications for disease suppressiveness. *Annual Review of Phytopathology*, 42(1), 243-270. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.42.012604.135455>
- Gómez Expósito, R., de Bruijn, I., Postma, J., and Raaijmakers, J. M. (2017). current insights into the role of rhizosphere bacteria in disease suppressive soils. *Frontiers in Microbiology*, 8(2529), 1-12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02529>
- Gu, S., Yang, T., Shao, Z., Wang, T., Cao, K., Jousset, A., Friman, V. P., Mallon, C., Mei, X., Wei, Z., Xu, Y., Shen, Q., and Pommier, T. (2020). Siderophore-mediated interactions determine the disease suppressiveness of microbial consortia. *mSystems*, 5(3), e00811-19. <https://doi.org/10.1128/mSystems.00811-19>





- Heil, M., and Bostock, R. (2002). Induced systemic resistance (ISR) against pathogens in the context of induced plant defences. *Annals of Botany*, 89(5), 503-512. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf076>
- González-Hernández A. I., Suárez-Fernández M. B., Pérez-Sánchez R., Gómez-Sánchez M. Á., Morales-Corts M. R. (2021). Compost tea induces growth and resistance against *Rhizoctonia solani* and *Phytophthora capsici* in pepper. *Agronomy*, 11(4), 1-12. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040781>
- Hu, W., Gao, Q., Hamada, M. S., Dawood, D. H., Zheng, J., Chen, Y., and Ma, Z. (2014). Potential of *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aurantiaca* strain pcho10 as a biocontrol agent against *Fusarium graminearum*. *Phytopathology*, 104(12), 1289-1297. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-02-14-0049-R>
- Jayaraman, S., Naorem, A. K., Lal, R., Dalal, R. C., Sinha, N. K., Patra, A. K., and Chaudhari, S. K. (2021). Disease-suppressive soils—beyond food production: A critical review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(2), 1437-1465. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00451-x>
- Kibblewhite, M. G., Ritz, K., and Swift, M. J. (2008). Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), 685-701. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>
- Kopittke, P. M., Menzies, N. W., Wang, P., McKenna, B. A., and Lombi, E. (2019). Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*, 132(105078), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>
- Kopecky, J., Samkova, Z., Sarikhani, E., Kyselková, M., Omelka, M., Kristufek, V., Divis, J., Grundmann, G. G., Moënné-Loccoz, Y., and Sagova-Mareckova, M. (2019). Bacterial, archaeal and micro-eukaryotic communities characterize a disease-suppressive or conducive soil and a cultivar resistant or susceptible to common scab. *Sci Rep*, 9(14883), 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51570-6>
- Kwak, Y. S., and Weller, D. M. (2013). Take-all of wheat and natural disease suppression: A review. *The Plant Pathology Journal*, 29(2), 125-135. <https://doi.org/10.5423/PPJ.SI.07.2012.0112>
- Le, K. D., Yu, N. H., Park, A. R., Park, D. J., Kim, C. J., Kim, J. C. (2022). *Streptomyces* sp. AN090126 as a biocontrol agent against bacterial and fungal plant diseases. *Microorganisms*, 10(4), 1-15. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10040791>
- Liu, H., Li, J., Carvalhais, L. C., Percy, C. D., Prakash Verma, J., Schenk, P. M., and Singh, B. K. (2021). Evidence for the plant recruitment of beneficial microbes to suppress soil-borne pathogens. *The New Phytologist*, 229(5), 2873-2885. <https://doi.org/10.1111/nph.17057>
- Lucas, P. (2006). Diseases caused by soil-borne pathogens. En B. M. Cooke, D. G. Jones, and B. Kaye (Eds.), *The Epidemiology of Plant Diseases* (2nd ed., pp. 373-386).
- Mazzola, M. (2002). Mechanisms of natural soil suppressiveness to soilborne diseases. *Antonie van Leeuwenhoek*, 8, 557-564. <https://doi.org/10.1023/A:1020557523557>
- Mazzola, M. (2007). Manipulation of rhizosphere bacterial communities to induce suppressive soils. *Journal of nematology*, 39(3), 213-220
- Mendes, R., Kruijt, M., de Bruijn, I., Dekkers, E., van der Voort, M., Schneider, J. H. M., Piceno, Y. M., DeSantis, T. Z., Andersen, G. L., Bakker, P. A. H. M., and Raaijmakers, J. M. (2011). Deciphering





- the rhizosphere microbiome for disease-suppressive bacteria. *Science*, 332(6033), 1097-1100.
<https://doi.org/10.1126/science.1203980>
- Mengesha, W. K., Powelli, S. M., Evans, K. J., and Barry, K. M. (2017). Diverse microbial communities in non-aerated compost teas suppress bacterial wilt. *World Journal of Microbiological Biotechnology*, 33(49), 1-14. doi: 101007/s11274-017-2212-y
- Mitchell, A. M., Strobel, G. A., Moore, E., Robison, R., and Sears, J. (2010). Volatile antimicrobials from *Muscodor crispans*, a novel endophytic fungus. *Microbiology*, 156(1), 270-277. <https://doi.org/10.1099/mic.0.032540-0>
- Mukherjee, P. K., Mendoza-Mendoza A., Zeilinger, S., and Horwitz B. A. (2022). Mycoparasitism as a mechanism of *Trichoderma*-mediated suppression of plant diseases. *Fungal Biology Reviews*, 39, 15-33. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2021.11.004>
- Noble, R., Roberts, S. J. (2004). Eradication of plant pathogens and nematodes during composting: a review. *Plant Pathol*, 53(5), 548-568. <https://doi.org/10.1111/j.0032-0862.2004.01059.x>
- Palojärvi, A., Kellock, M., Parikka P., Jauhiainen, L., Alakukku, L.(2020). Tillage system and crop sequence affect soil disease suppressiveness and carbon status in boreal climate. *Frontier in Microbiolgy*, 11, 534786. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.534786>
- Raaijmakers, J. M., and Mazzola, M. (2016). Soil immune responses. *Science*, 352(6292), 1392-1393. <https://doi.org/10.1126/science.aaf3252>
- Raaijmakers, J. M., Vlami, M., and de Souza, J. T. (2002). Antibiotic production by bacterial biocontrol agents. *Antonie Van Leeuwenhoek* 81, 537-547. <https://doi.org/10.1023/A:1020501420831>
- Rana, A., Sudakov, K., Carmeli, S., Miyara, S. B., Bucki, P., and Minz, D. (2024). Volatile organic compounds of the soil bacterium *Bacillus halotolerans* suppress pathogens and elicit defense-responsive genes in plants. *Microbiological Research*, 281(127611), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127611>
- Rudrappa T., Czymbek K. J., Pare P. W., and Bais H. P. (2008) Root-secreted malic acid recruits beneficial soil bacteria. *Plant Physiol* 148(3),1547-1556. <https://doi.org/10.1104/pp.108.127613>
- Sagova-Mareckova, M., Omelka, M., and Kopecky, J. (2022). The golden goal of soil management: Disease-Suppressive soils. *Phytopathology*, 113(4), 741-752. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-09-22-0324-KD>
- Scheuerell, S. J., Mahaffee, W. (2004). Compost tea as a container medium drench for suppressing seedling damping-off caused by *Pythium ultimum*. *Phytopathology*, 94, 1156-1163. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2004.94.11.1156>
- Schlatter, D., Kinkel, L., Thomashow, L., Weller, D., and Paulitz, T. C. (2017). Disease Suppressive Soils: New Insights from the Soil Microbiome. *Phytopathology*, 107(11), 1284-1297. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-03-17-0111-RVW>
- Siegel-Hertz, K., Edel-Hermann, V., Chapelle, E., Terrat, S., Raaijmakers, J. M., and Steinberg, C. (2018). comparative microbiome analysis of a *Fusarium* wilt suppressive soil and a *Fusarium* wilt conducive soil from the Châteaurenard region. *Frontiers in Microbiology*, 9(568), 1-16. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00568>
- St. Martin, C. C. G. (2014). Potential of compost tea for suppressing plant diseases. *CABI Reviews* 3(32), 1-38. DOI: 10.1079/PAVSNNR20149032





- Steinberg, C., Edel-Hermann, V., Alabouvette, C., and Lemanceau, P. (2019). Soil suppressiveness to plant diseases. En *Modern Soil Microbiology* (3rd ed., pp. 343-357). Taylor and Francis. <https://doi.org/10.1201/9780429059186>
- Voroney, R. P., and Heck, R. J. (2015). Chapter 2—The Soil Habitat. En E. A. Paul (Ed.), *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry* (4th Edition pp. 15-39). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415955-6.00002-5>
- Weller, D. M., Raaijmakers, J. M., Gardener, B. B. M., and Thomashow, L. S. (2002). Microbial populations responsible for specific soil suppressiveness to plant pathogens. *Annual Review of Phytopathology*, 40(1), 309-348. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.40.030402.110010>
- Wen, T., Ding, Z., Thomashow, L. S., Hale, L., Yang, S., Xie, P., Liu, X., Wang, H., Shen, Q., and Yuan, J. (2023). Deciphering the mechanism of fungal pathogen-induced disease-suppressive soil. *New Phytologist*, 238(6), 2634-2650. <https://doi.org/10.1111/nph.18886>

