



TOLERANCIA A CADMIO Y RESISTENCIA AL DAÑO POR *Bemisia tabaci* INDUCIDA POR UN CONSORCIO DE HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EN *Solanum lycopersicum* L. †

[CADMIUM TOLERANCE AND RESISTANCE TO DAMAGE BY *Bemisia tabaci* INDUCED BY A CONSORTIUM OF ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI IN *Solanum lycopersicum* L.]

Shirley Margarita Amaya-Martín¹, Horacio Salomón Ballina-Gómez^{1*}, Carlos Juan Alvarado-López², Esau Ruiz-Sánchez¹, María Lourdes Gil-Cardeza³ and Gabriel De Jesús Azcorra-Perera⁴

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Campus Conkal. Avenida Tecnológico s/n, C.P. 97345, Conkal, Yucatán, México. Email: shirley.amaya@itconkal.edu.mx; * horacio.bg@conkal.tecnm.mx; esau.rs@conkal.tecnm.mx

² CONACYT, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Campus Conkal. Avenida Tecnológico s/n, C.P. 97345, Conkal, Yucatán, México. Email: carlos.al@conkal.tecnm.mx

³ Laboratorio de Biodiversidad Vegetal y Microbiana, Facultad de Cs Agrarias, Universidad Nacional de Rosario, Campo Exp. Villarino, Zavalla (2123), Argentina. Email: lourgilcardeza@gmail.com

⁴ Departamento de ingenierías, Tecnológico Nacional de México/Campus Conkal. Avenida Tecnológico s/n, C.P. 97345, Conkal, Yucatán, México. Email: gabriel.ap@conkal.tecnm.mx

*Corresponding author

SUMMARY

Background. Cadmium (Cd) is a potentially toxic element that when released in permeable soils such as those of Yucatan enters directly into the horticultural systems and in general into the food web causing several problems. It is known that tomato (*Solanum lycopersicum* L.) shows tolerance to the element cadmium and resistance to damage by various pests, however, the biological mechanism that is triggered in its interaction with microorganisms under this type of stress conditions is little known. **Objective.** To analyze the effect of a consortium of arbuscular mycorrhizal fungi on Cd tolerance and resistance to *B. tabaci* damage in *S. lycopersicum* L. **Methodology.** A split-plot design was used with the following factors: 1) mycorrhizal fungal consortium: control (M-) and mycorrhizal fungal (M+); 2) damage by *B. tabaci*: control (D-) and presence (D+); and 3) addition of Cd at three levels: control (C), Cd at 0.005 ppm (Cd+) and Cd at 0.020 ppm (Cd++). Mycorrhization, growth and plant defense were estimated. **Results.** Colonization of 39% and 49% was found, even with the addition of Cd+ and Cd++, respectively. Likewise, positive effects of mycorrhizal fungi on plant height growth and leaf thickness were recorded, interestingly despite the addition of cadmium. Also, compensatory growth responses in terms of leaflet production were recorded, but in the absence of mycorrhizal fungi and in the presence of *B. tabaci*. Additionally, the mycorrhizal fungi produced less hard leaves in the presence of *B. tabaci*, which suggests an effect of an improvement in the nutritional quality of the leaves. **Implications.** Plant growth of tomato plants could be as result of inherent plant growth more than other extrinsically factors such as cadmium or *B. tabaci*. **Conclusions.** Tomato plants showed positive effects on cadmium tolerance and resistance to damage by *B. tabaci*, although inherent plant growth could be a very important mechanism to be considered in the future. **Key words:** Plant growth; defense; heavy metals; beneficial microorganisms; tomato.

RESUMEN

Antecedentes. El cadmio (Cd) es un elemento potencialmente tóxico que al ser vertido en suelos permeables como los de Yucatán entra directamente a los sistemas hortícolas y en general a la red trófica causando diversos problemas. Se tiene registro que el tomate (*S. lycopersicum* L.) muestra tolerancia al elemento Cd y resistencia al

† Submitted May 7, 2024 – Accepted November 25, 2024. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5604>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = Shirley Margarita Amaya-Martín: <http://orcid.org/0000-0001-9591-6414>; Horacio Salomón Ballina-Gómez: <http://orcid.org/0000-0002-0561-9027>; Carlos Juan Alvarado-López: <http://orcid.org/0000-0001-7442-8171>; Esau Ruiz-Sánchez: <http://orcid.org/0000-0003-0245-3305>; María Lourdes Gil-Cardeza: <http://orcid.org/0000-0001-7769-9524>; Gabriel De Jesús Azcorra-Perera: <http://orcid.org/0000-0003-2670-7568>

daño a diversas plagas, sin embargo, es poco conocido el mecanismo biológico que se desencadena en su interacción con microorganismos en condiciones de estrés. **Objetivo.** Analizar el efecto de un consorcio de hongos micorrízicos arbusculares en la tolerancia a Cd y resistencia al daño por *Bemisia tabaci* en *S. lycopersicum* L. **Metodología.** Se usó un diseño de parcelas sub-divididas con los siguientes factores: 1) consorcio de hongos micorrízicos: control (M-) y hongo micorrízico (M+); 2) daño por *B. tabaci*: control (D-) y daño (D+); y, 3) adición de Cd a tres niveles: control (C), Cd a 0.005 ppm (Cd+) y Cd a 0.020 ppm (Cd++). Se estimó la micorrización, crecimiento y defensa vegetal. **Resultados.** Se encontró una colonización de un 39% y 49%, aún con la adición de Cd+ y Cd++, respectivamente. Asimismo, se registraron efectos positivos de los hongos micorrízicos sobre el crecimiento en altura de las plantas y en el grosor foliar, interesantemente a pesar de la adición de Cd. También, se registraron respuestas de crecimiento compensatorio en términos de producción de folíolos, pero en ausencia de hongos micorrízicos y en presencia de *B. tabaci*. Adicionalmente, los hongos micorrízicos produjeron hojas menos duras en presencia de *B. tabaci*, lo que sugiere un efecto de una mejora en la calidad nutricional de las hojas. **Implicaciones.** El crecimiento de tomate podría deberse más al crecimiento inherente de la planta que a otros factores extrínsecos como el Cd o *B. tabaci*. **Conclusiones.** Las plantas de tomate mostraron efectos positivos sobre la tolerancia al Cd y la resistencia al daño de *B. tabaci*, aunque el crecimiento inherente de la planta podría ser un mecanismo muy importante a considerar en el futuro.

Palabras clave: crecimiento vegetal; defensa; metales pesados; microorganismos benéficos; tomate.

INTRODUCCIÓN

El aumento de la población ha incrementado la emisión de contaminantes en el ambiente (Ashraf *et al.* 2010; Cherian y Oliveira 2005; Roy y McDonald 2015), el grupo más reconocido en la actualidad es el de los elementos potencialmente tóxicos (EPT's) en el que se incluyen: el Cd, el cromo (Cr), el cobre (Cu), el mercurio (Hg), el níquel (Ni), zinc (Zn), el plomo (Pb) y el arsénico As (metaloides) (Galán-Huertos y Romero-Baena 2008; Järup 2003; Meier *et al.* 2012). Algunos elementos de este grupo son esenciales y otros no tienen funciones fisiológicas reconocidas para los organismos vivos, por lo que su presencia en el suelo siempre será un riesgo potencial, primero para las plantas y posteriormente para el resto de la cadena trófica (Costa *et al.* 1987). El riesgo radica en la combinación de altas concentraciones de estos metales, bajo PH y su uso en tierras cultivables (Zhao *et al.* 2012).

La península de Yucatán presenta un suelo kárstico y permeable que ponen en riesgo la calidad del acuífero, debido al fácil ingreso de contaminantes antrópicos (Ashraf *et al.* 2010; Zhao *et al.* 2012). Estudios comparativos sobre la calidad de agua, respecto a los límites permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127- SSA1-1994, han informado que el elemento traza que excede en un 100% estos límites es el Cd (Arcega-Cabrera y Fargher 2016). La concentración de Cd que ingresa por riego a los suelos y posteriormente a los cultivos agrícolas dependerá de las propiedades de los primeros y de las especies vegetales. Diversos estudios han informado que la ingesta de alimentos contaminados con Cd a largo plazo ocasiona problemas serios de salud. Una alternativa para estabilizar los contenidos de EPT's en la red trófica, es la aplicación de las nuevas tecnologías biológicas que incluyen la fitorremediación y micorrizoestabilización (Siddiqui y Pichtel 2008). Estas técnicas individualmente han tenido resultados

exitosos en varios cultivos como: maíz (*Zea mays* L.), Girasol (*Helianthus annuus* L.), Nabo (*Brassica campestris* L.), Arveja (*Pisum sativum* L.), soja (*Glycine max* (L.) Merrill. Sin embargo, la integración de las dos técnicas resulta más eficiente. Por un lado, la fitorremediación utiliza la capacidad de las plantas para metabolizar moléculas en sus tejidos ante la presencia de EPT's, y por otro lado la micorrizoestabilización consiste en la tolerancia al efecto directo de los metales tóxicos (Gil-Cardesa *et al.* 2014; Baghaie *et al.* 2019), que ocurre a partir de la relación simbiótica entre las raíces de muchas plantas y hongos micorrízicos arbusculares (HMA). Otro de los beneficios la inoculación por hongos micorrízicos, es la resistencia inducida (priming) en las plantas contra diversos agresores (Delgado-Oramas 2020).

Los mecanismos biológicos que intervienen como efecto de la integración entre plantas y hongos micorrízicos para la tolerancia a Cd y resistencia a plagas en especies agrícolas (Casteblanco 2018), aún resulta escasa, por lo que es necesario seguir investigando sobre todo en cultivos de interés mundial y económico como lo es el tomate (*S. lycopersicum* L.) que además ha sido usada como planta modelo en distintas investigaciones debido a las características morfológicas que poseen sus órganos, y con las que otras plantas modelo como el arroz y *Arabidopsis* no cuentan (Caballero-Mellado *et al.* 2007). Por lo tanto, en el presente estudio se analizó el efecto de un consorcio de micorrizas arbusculares en la tolerancia a Cd y resistencia al daño por *B. tabaci* en *Solanum lycopersicum* L.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El estudio se realizó en un área de producción agrícola ubicado en el municipio de Xmatkuil, Yucatán, México (20° 54' 21" N y 89° 37' 17" W)

(Fig. 1a). La temperatura y precipitación media anual son de 26.2 °C y 1023.8 mm, y se encuentra a 10 msnm. El experimento se realizó en los meses de noviembre de 2020 a marzo de 2021.

Diseño experimental

Se estableció un diseño experimental de parcelas subdivididas completamente al azar con los siguientes factores: 1) consorcio de hongos micorrízicos a dos niveles: sin hongos micorrízicos (M-) y con hongos micorrízicos (M+); 2) daño por *B. tabaci* a dos niveles: sin daño (D-) y con daño (D+); y, 3) aplicación de Cd a tres niveles: control (C), Cd 0.005 ppm (Cd+) y Cd 0.020 ppm (Cd++) (Fig. 1). Cada tratamiento tuvo seis repeticiones para un total de 72 unidades experimentales.

Desarrollo del experimento

Se utilizaron semillas comerciales de *S. lycopersicum* L. (variedad Saladette) las cuales se sembraron en semilleros y fueron desinfectadas previamente con hipoclorito de sodio al 1% y luego se enjuagaron con abundante agua corriente por cinco minutos. A cada orificio de la charola de germinación se le agregó 1 g de inóculo de consorcio de hongos micorrízicos (Glumix®) (Composición: 20,000 esporas viables por kg), junto con suelo de tipo leptozol esterilizado. Cuando las plántulas tuvieron 20 a 30 días de edad, se trasplantaron a macetas de 5 kg con suelo de tipo leptozol esterilizado químicamente con formaldehído al 37% (Covacevich *et al.* 2014). El manejo del cultivo se realizó según lo recomendado por López (2017), con la modificación de usar una dosis única de 3 g por

planta del fertilizante Triple 17 al inicio del experimento, para no interferir con el efecto del consorcio de hongos micorrízicos.

Adición de Cd

Después del trasplante de *S. lycopersicum* a macetas, se aplicó el Cd usando estándar de Cd a 1000 ppm (1ml/L). El estándar de Cd se usó a dos concentraciones. La primera se preparó diluyendo 0.05 ml del estándar en 10 L de agua destilada para obtener una concentración de 0.005 ppm (para el total de plantas con este tratamiento) y para la segunda concentración se diluyeron 0.2 ml del estándar en 10 L agua destilada para obtener 0.020 ppm. Las variables de respuesta se registraron a los 15, 30, 45, 60, 90, 120 y 160 días.

Colonización micorrízica

Se determinó la colonización de hongos micorrízicos en dos evaluaciones y según la metodología usada por Giovannetti y Mosse (1980), y Kormanik y McGraw (1982). La primera evaluación se realizó previo a la exposición con Cd, mientras que la segunda o final se realizó en todos los tratamientos a los 160 días. Para ellos, las raíces teñidas se cortaron en segmentos de aproximadamente 2 cm, se usaron 15 fragmentos por cada porta objetos con tres repeticiones por tratamiento de planta micorrizada, en total se revisaron 54 porta objetos obteniendo un total de 405 campos de observación, los cuales se evaluaron al microscopio con los objetivos 10X y 40X. Se usó la escala de clases de Trouvelot (Gianinazzi *et al.* 1989) para determinar el porcentaje de



Figura 1. Hongos micorrízicos y cadmio en tomate. Área de estudio (a), exclusorios con plantas de tomate (b), huevos (c), ninfas (d) y adultos de *B. tabaci* (e).

colonización micorrícica (CM), frecuencia de micorrizas en el sistema radicular (F%), intensidad de la colonización micorrícica en el sistema radicular (M%) y abundancia de arbusculos en el sistema radicular (A) en el programa programa Mycocalc.

Tolerancia vegetal y daño por mosquita blanca

La tolerancia vegetal se cuantificó en términos del crecimiento vegetal en altura (cm), diámetro basal con la ayuda de un vernier digital (Mitutoyo, modelo CD67-S15PS JPN) y número de folíolos a los 60, 90 y 120 días. La resistencia vegetal se estimó en términos del grosor foliar con la ayuda de un micrómetro digital (Mitutoyo, modelo H-2780 JPN) y la dureza foliar con un penetrómetro portátil (AMS, modelo 59032 OSHA, EUA). En la tolerancia se seleccionaron al azar 12 plantas por tratamiento y en la resistencia, 6 plantas y en cada una de ellas, se usaron las 2 hojas más nuevas (n= 12 hojas por tratamiento).

Se estimó la densidad poblacional de *B. tabaci* en las plantas donde se encontró y las cuales correspondieron a los tratamientos con su presencia. Esto se realizó mediante el registro de adultos, huevos y ninfas dividiendo cada planta en tres estratos y tomando 12 hojas de 6 plantas por tratamiento. Para el conteo de los individuos se consideró la superficie foliar abaxial de hojas desde el ápice. Los folíolos se cortaron de la planta para facilitar el recuento de huevos y ninfas bajo un microscopio estereoscópico digital a 10 X y 200 X

(Digital microscope USB) (Hilje y Morales 2008; Firdaus *et al.* 2012; Santelices *et al.* 2015).

Análisis de datos

Se realizaron análisis de varianza de una vía (ANOVA) para evaluar las variables de micorrización como frecuencia de micorrizas (F%), intensidad de la colonización micorrícica (M%) y abundancia de arbusculos (A%). Además, se usaron análisis de varianza de parcelas sub-divididas (Anova split-split-plot) para evaluar los efectos sobre el crecimiento y la resistencia. Adicionalmente, se aplicaron modelos lineales generalizados (glm) para las variables de resistencia. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el paquete estadístico Infostat 19 y SPSS 19 para Windows.

RESULTADOS

Colonización de hongos micorrízicos en plantas con Cd

El Cd afectó la colonización de hongos micorrízicos en forma estadísticamente significativa tanto en la frecuencia de hongos micorrízicos (F%) ($F= 7.34$, $gl= 2$, $P= 0.0009$), la intensidad de la colonización de hongos micorrízicos (M%) ($F= 18.93$, $gl= 2$, $P= 0.0001$) como en la abundancia de arbusculos en el sistema radicular (A%) ($F= 10.77$, $gl= 2$, $P= 0.0001$) (Fig. 2).

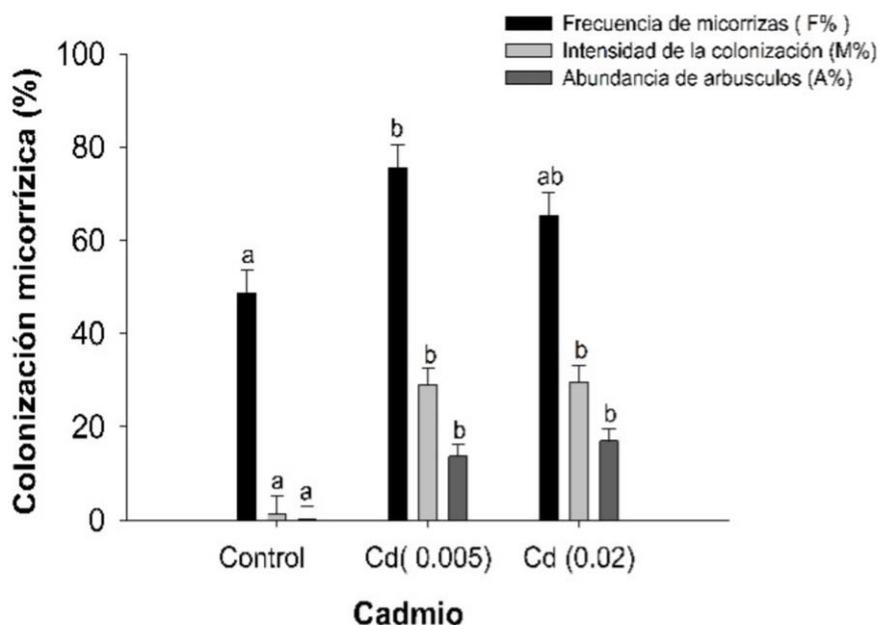


Figura 2. Colonización micorrízica en raíces de *S. lycopersicum* adicionadas con Cd a 160 días después del trasplante. Letras distintas en el mismo color de rectángulo indican diferencias estadísticamente significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

La frecuencia de hongos micorrízicos (F%) en Cd+ fue de 85 ± 18 % y con Cd++ fue de 88 ± 16 %. La intensidad de colonización de hongos micorrízicos (M%) en Cd+ fue de 39 ± 29 % y con Cd++ de 49 ± 33 %. Además, la abundancia de arbusculos (A%) en Cd+ fue de 0.4 ± 0.1 % y en Cd++ de 0.7 ± 0.2 % (Fig. 2).

Hongos micorrízicos y Cd sobre las respuestas de crecimiento y defensa

Los factores hongos micorrízicos y Cd afectaron significativamente las variables de crecimiento durante el desarrollo del tomate (15 a los 120 días). A los 15 días, se observaron diferencias significativas por los hongos micorrízicos y el Cd ($P=0.01$). Por ejemplo, el diámetro fue mayor en las plantas sin Cd y con hongos micorrízicos, al igual que en plantas con hongos micorrízicos y con Cd++, y en plantas sin hongos micorrízicos pero con Cd+ (Fig. 3). A los 30 días, la altura fue mayor en las plantas creciendo con Cd++ ($P=0.02$). A los 45 días, también la altura fue mayor en plantas sin hongos micorrízicos y sin Cd ($P=0.03$) (Fig. 3).

Cuando se analizaron las variables de defensa, se observó que los hongos micorrízicos y el Cd solo afectaron en forma significativa el grosor foliar a los 30 y 90 días. Ya que a los 15, 45, 60 y 120 días, no se encontraron efectos significativos en alguna variable (Fig. 4). A los 30 días el grosor ($P=0.01$) difirió significativamente entre tratamientos, siendo mayor en las plantas con hongos micorrízicos y con Cd++ (Fig. 4). Sin embargo, a los 90 días, en forma opuesta, las plantas sin hongos micorrízicos ni Cd fueron las que tuvieron mayor grosor ($P=0.03$). La dureza foliar no difirió por el efecto de los hongos micorrízicos y el Cd.

Hongos micorrízicos y *B. tabaci* sobre el crecimiento y defensa

A los 60 días del experimento, se cuantificó la población de *B. tabaci* en los tratamientos control y hongos micorrízicos. En el grupo control, tuvieron una media y error estándar de huevos de 6.51 ± 3.34 y en el de hongos micorrízicos de 6.13 ± 3.42 . La población de ninfas en el control fue de 2.96 ± 1.52 y en el de hongos micorrízicos de 1.46 ± 0.8 . Por su parte, la población de mosquitos blancas adultas en el control fue de 1.27 ± 0.45 y en el de hongos micorrízicos de 1.07 ± 0.3 .

Cuando se analizó el efecto del crecimiento, no se observaron efectos estadísticamente significativos a

excepción de la producción de folíolos, los cuales fueron producidos en mayor cantidad por las plantas sin hongos micorrízicos y con *B. tabaci*, a los 120 días ($P=0.005$) (Fig. 5).

Para las variables de defensa, solamente a los 60 días se observaron diferencias estadísticamente significativas y específicamente con la dureza foliar ($P=0.04$), ya que las plantas sin hongos micorrízicos y sin *B. tabaci* tuvieron mayores valores, a diferencia de las plantas con hongos micorrízicos y con *B. tabaci*, con hojas más suaves (Fig. 6).

DISCUSIÓN

Colonización de hongos micorrízicos en raíces expuestas a Cd

En este proyecto de investigación uno de los objetivos planteados fue si el consorcio de hongos micorrízicos arbusculares podría colonizar el sistema radicular de *S. lycopersicum* L. en tratamientos con Cd, ya que la sensibilidad de organismos endófitos como los hongos micorrízicos ante la presencia de los elementos potencialmente tóxicos (EPT's), retrasa su capacidad de colonización (Díaz *et al.* 1996). Sin embargo, se observó que la colonización de HMA en raíces de *S. lycopersicum* L. con Cd+ (0.005ppm) y Cd ++ (0.02 ppm) fue del 39% y 49% respectivamente, estos resultados son semejantes a lo reportado por Hassan *et al.* (2013) donde observaron colonización de hongos micorrízicos que va de 38% a 43% en plantas de girasol con tratamientos de Cd. Sin embargo, Gil-Cardesa *et al.* (2014) reporta un 51 % de colonización de hongos micorrízicos en raíces de *R. communis* con cromo (Cr VI). Por otro lado, Bi *et al.* (2018) reportan hasta un 78% de colonización de hongos micorrízicos en plantas de *Amygdalus pedunculata* Pall. expuestas a una mina de carbón. El hecho de que la colonización del consorcio de hongos micorrízicos se haya presentado en plantas de *S. lycopersicum* L. con Cd a 0.005 ppm y 0.20 ppm, confirma hasta cierto punto, parte de nuestra hipótesis sobre el beneficio tolerante debido a mecanismos biológicos. Los cuales se relacionan con las estructuras de los hongos micorrízicos, ya que su aporte a la resiliencia de comunidades de plantas en ambiente perturbados sucede a través del desarrollo de su red hifal (Bi y Zhang 2018). Esta red produce una glicoproteína conocida como glomalina (GRSP) asociada al almacenamiento de carbono, secuestro de EPT's y estabilidad del suelo (Cornejo *et al.* 2008; Bediní *et al.* 2007; Gil-Cardesa *et al.* 2014).

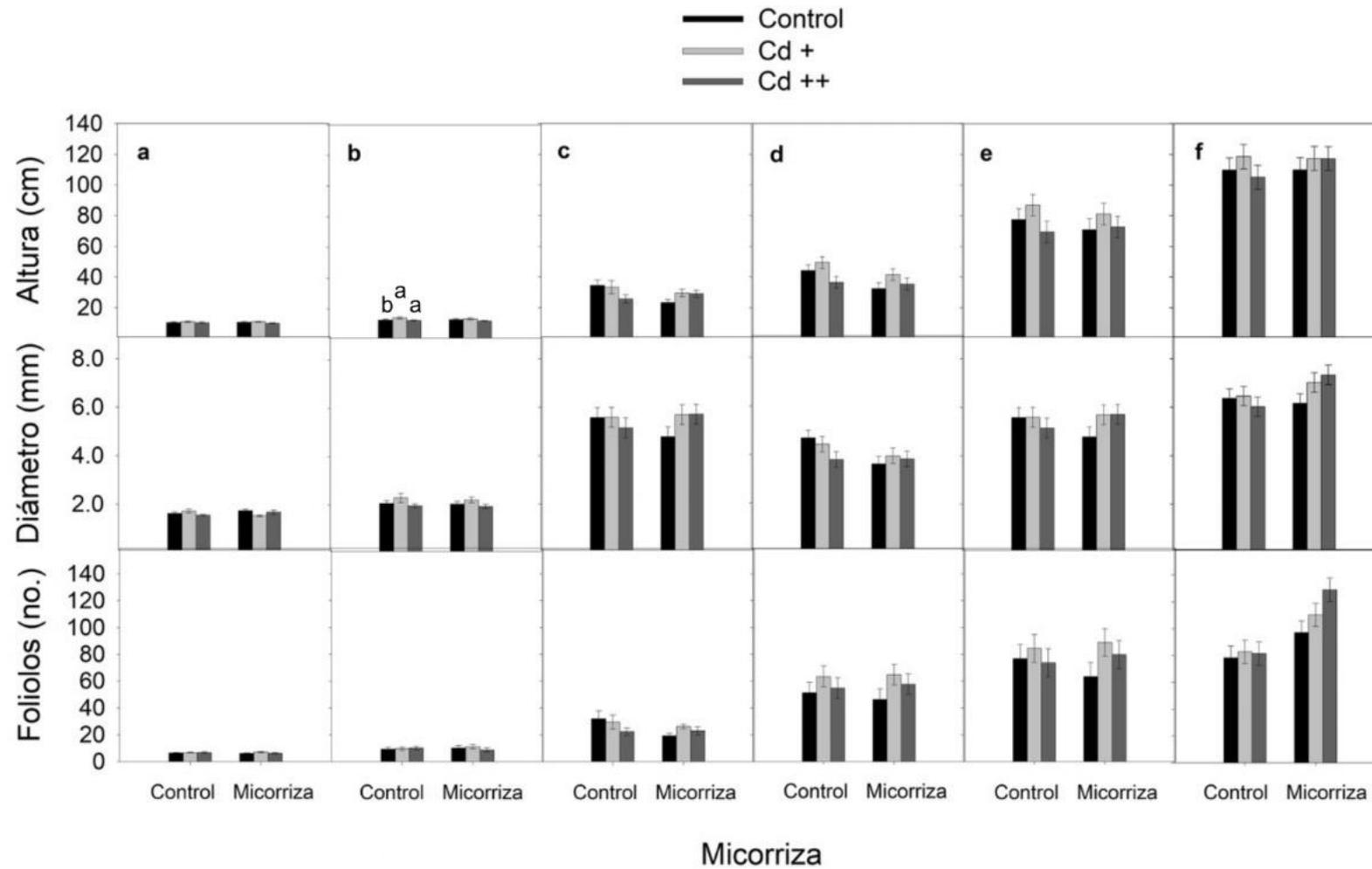


Figura 3. Efectos de las micorrizas y la adición de Cd en el crecimiento de *S. lycopersicum* L. a los 15 (a), 30 (b), 45 (c), 60 (d), 90 (e) y 120 días (f) del experimento. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas, letras similares o ausencia de ellas, indican que no hubieron tales diferencias según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

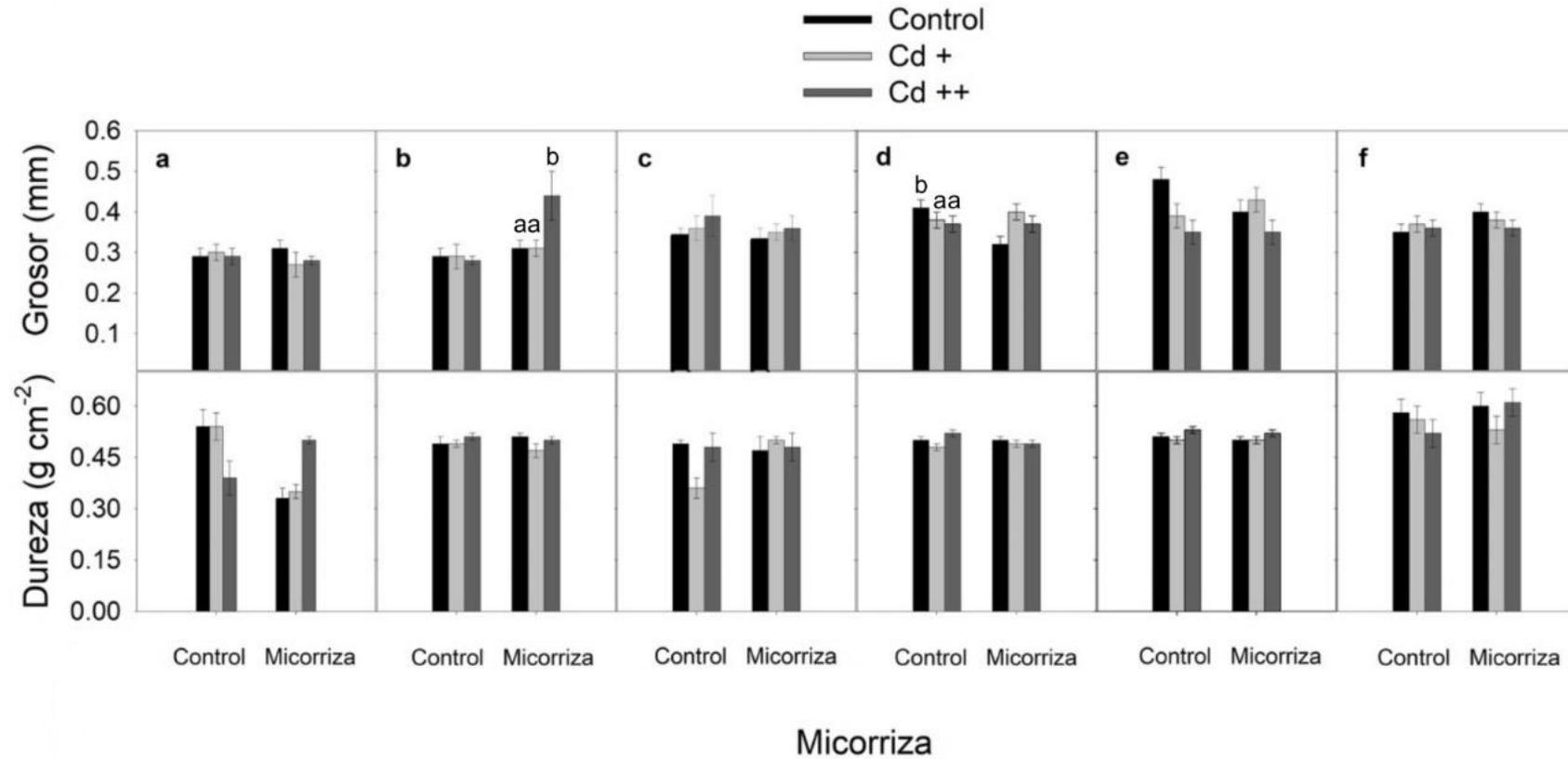


Figura 4. Efectos de las micorrizas y la adición de Cd en la defensa física de *S. lycopersicum* L. a los 15 (a), 30 (b), 45 (c), 60 (d), 90 (e) y 120 días (f) del experimento. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas, letras similares o ausencia de ellas, indican que no hubieron tales diferencias según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

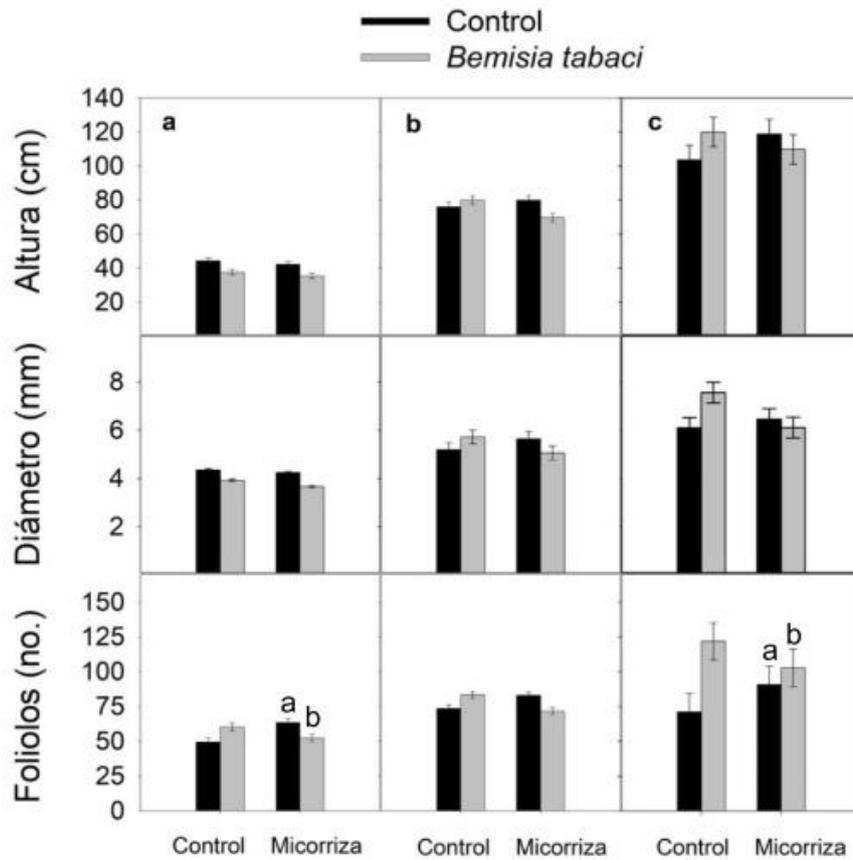


Figura 5. Efectos de las micorrizas y *Bemisia tabaci* en el crecimiento de *S. lycopersicum* L. a los 60 (a), 90 (b) y 120 días (c) del experimento. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas, letras similares o ausencia de ellas, indican que no hubieron tales diferencias según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

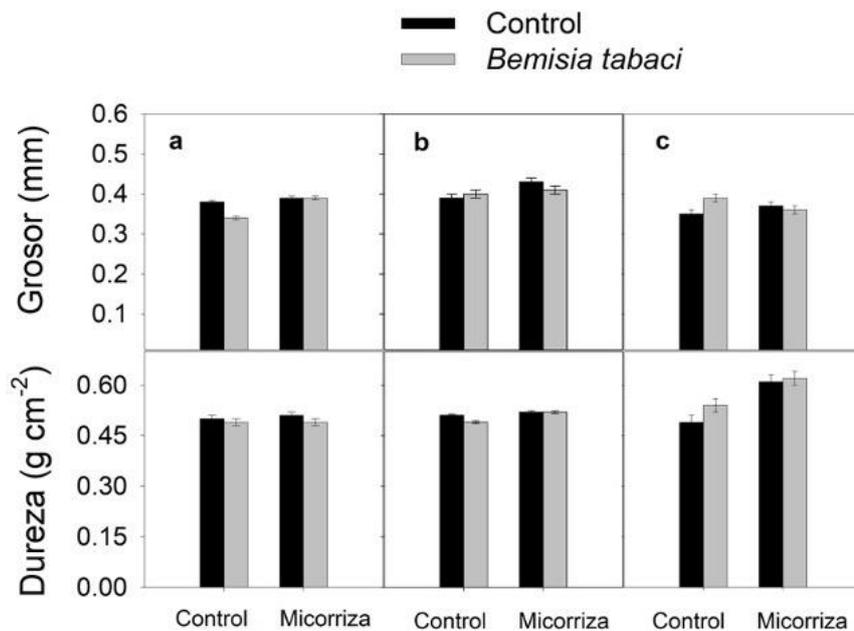


Figura 6. Efectos de las micorrizas y *Bemisia tabaci* en la defensa de *S. lycopersicum* L. a los 60 (a), 90 (b) y 120 días (c) del experimento. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas, letras similares o ausencia de ellas, indican que no hubieron tales diferencias según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

Hongos micorrízicos y Cd sobre las respuestas de crecimiento y defensa

Encontramos efectos positivos de los hongos micorrízicos sobre el crecimiento y la defensa vegetal, aún con la adición de Cd. Estos resultados coinciden con los de Pérez-Moncada *et al.* (2019) quienes reportan valores iguales o superiores en las variables, hojas, tallos y raíces de plantas de cacao inoculadas con hongos micorrízicos a diferentes dosis con Cd. También con los estudios de Pimienta-Barrios *et al.* (2009) los cuales reportaron un aumento en el espesor (clorénquima) de hojas de plantas micorrizadas y mencionan que es probable que esta característica esté relacionada con la incorporación de nitrógeno, ya que este elemento estimula el crecimiento de las hojas. Además, atribuimos la recuperación de los órganos vegetales en la mayoría de las plantas a la presencia de hongos micorrízicos, ya que autores como Cornejo *et al.* (2008), Bediní *et al.* (2007), Gil-Cardesa *et al.* (2014), Liu *et al.* (2014), Jiang *et al.* (2017), Gunathilakae *et al.* (2018) y Chang *et al.* (2018), mencionan que la recuperación de plantas micorrizadas en presencia de EPT's, se debe únicamente a los mecanismos y compuestos de los hongos micorrízicos para reducir la toxicidad en los suelos, ya que mediante la glomalina son capaces de secuestrar los metales. A pesar que en la literatura se han registrado efectos negativos del Cd sobre el crecimiento vegetal (Chang *et al.* 2018; Borjas-Ventura *et al.* 2022), solo observamos ligeros decrementos en el crecimiento, lo cual hasta cierto punto es un indicativo de toxicidad con Cd (Hernández-Baranda *et al.* 2019). Es posible que los hongos micorrízicos hayan minimizado el efecto potencialmente tóxico del Cd, debido a las funciones de bioabsorción y bioacumulación sobre este metal (Aguirre *et al.* 2011).

Hongos micorrízicos y *B. tabaci* sobre el crecimiento y defensa

Cuando evaluamos el efecto sinérgico de los hongos micorrízicos y *B. tabaci*, sorpresivamente no encontramos evidencia contundente de un efecto positivo de estos hongos, ya que solo la producción de folíolos incrementó pero sin su adición. Esto contrasta con los innumerables estudios que han registrado el efecto positivo de los hongos micorrízicos sobre el crecimiento vegetal (Koza *et al.* 2022; Legesse *et al.* 2024). Pensamos que este resultado puede estar enmascarado por los efectos de sinergia causados por el daño de insectos, y sugiere que *S. lycopersicum* pudo haber presentado una respuesta compensatoria expresada en la producción de folíolos (González-Klenner *et al.* 2022). Otros estudios han registrado tal recuperación del tejido vegetal en cultivos agrícolas ante la presencia de daño por herbívoros (Real-Santillán *et al.* 2019;

Pérez-Moncada *et al.* 2019; Ley-Rivas *et al.* 2015; War *et al.* 2012). En forma interesante, también encontramos que la dureza foliar fue mayor sin la adición de hongos micorrízicos y sin *B. tabaci*. Lo cual podría responder a una mejoría en la calidad nutricional de las hojas de tomate causada por los hongos micorrízicos (Locke y Crawford 2022), por tanto esto causaría un efecto de atracción hacia hojas más palatables (más suaves). Aunque este mecanismo de comprometer los recursos hacia el crecimiento o defensa (Engelberth y Engelberth 2019) en sí, es regulado por las plantas, y no tanto por los hongos micorrízicos. Existe evidencia para ambos posibles resultados y lo cual es motivo de actual controversia a la luz de la ciencia.

CONCLUSIONES

Se encontró que el consorcio de hongos micorrízicos usado, colonizó las raíces de *S. lycopersicum* en un 39% y 49% aún con la adición de Cd+ y Cd++, respectivamente. Asimismo, se registraron efectos positivos de los hongos micorrízicos sobre el crecimiento en altura de las plantas y en el grosor foliar, interesantemente a pesar de la adición de Cd. También, se registraron respuestas de crecimiento compensatorio en términos de producción de folíolos, pero en ausencia de hongos micorrízicos y en presencia de *B. tabaci*. Adicionalmente los hongos micorrízicos produjeron hojas menos duras en presencia de *B. tabaci*, lo que sugiere un efecto de una mejora en la calidad nutricional de las hojas.

Funding. The following grant information was disclosed by the authors: CONAHCYT (S.M. Amaya-Martín, 998240), Tecnológico Nacional de México (TECNM) project: 10510.21-P "Tolerancia a cadmio y resistencia a herbívoros inducida por un consorcio de micorrizas arbusculares en *Solanum lycopersicum* L."

Conflict of interest. The authors declare there are no competing interests.

Compliance with ethical standards. This work does not require approval by a bioethical committee.

Data availability. The data are available from Horacio Salomón Ballina-Gómez, (horacio.bg@conkal.tecnm.mx) upon reasonable request.

Author Contribution Statement (CRediT). S.M. Amaya-Martín – Conceptualization, Methodology, Investigation, Formal analysis, Writing – original draft, Writing – review and editing. H.S. Ballina-Gómez – Funding acquisition, Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Supervision, Writing – original draft, Writing – review and editing. C.J. Alvarado-López – Conceptualization, Writing –

review and editing. **E. Ruiz-Sánchez** – Writing – review and editing. **M.L. Gil-Cardesa** – Writing – review and editing. **G.J. Azcorra-Perera** – Writing – review and editing.

REFERENCIAS

- Aguirre, W., Fischer, G. y Miranda, D., 2011. Tolerancia a metales pesados a través del uso de micorrizas arbusculares en plantas cultivadas. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 5, pp. 141-154. <https://doi.org/10.17584/rcch.2011v5i1.1260>
- Arcega-Cabrera, F. and Fargher, L.F., 2016. Education, fish consumption, well water, chicken coops, and cooking fires: Using biogeochemistry and ethnography to study exposure of children from Yucatan, Mexico to metals and arsenic. *Science of the Total Environment*, 568, pp. 75-82. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.209>
- Ashraf, M., Ozturk, M. and Ahmad, M.S.A., 2010. Toxins and their phytoremediation. In: M. Ashraf, M. Ozturk and M.S.A. Ahmad, eds. *Plant Adaptation and Phytoremediation*. Springer Netherlands. pp. 1–32.
- Baghaie, A.H., Aghili, F. and Jafarinia, R., 2019. Soil-indigenous arbuscular mycorrhizal fungi and zeolite addition to soil synergistically increase grain yield and reduce cadmium uptake of bread wheat (through improved nitrogen and phosphorus nutrition and immobilization of Cd in roots). *Environmental Science Pollution Research*, 26, pp. 30794-30807. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06237-0>
- Bedini, S., Avio, L., Argese, E. and Giovannetti, M., 2007. Effects of long-term land use on arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin-related soil protein. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 120, pp. 463-6. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.09.010>
- Bi, Y., Zhang, Y. and Zou, H., 2018. Plant growth and their root development after inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi in coal mine subsided areas. *International Journal of Coal Science and Technology*, 5, pp. 47-53. <https://doi.org/10.1007/s40789-018-0201-x>
- Borjas-Ventura, R., Bello-Medina, N., Bello-Amez, S., Alvarado-Huamán, L., Rebaza-Fernandez, D., Tapia Y Figueroa, L., Castro-Cepero, V. and Julca-Otiniano, A. 2022. Differentiation cadmium uptake and its effects on the physiology of six cacao genotypes (*Theobroma cacao* L.) in San Ramón, central Peruvian jungle. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25, pp. #087. <https://doi.org/10.56369/tsaes.4000>
- Caballero-Mellado, J., Onofre, J., Estrada, P. and Martínez, L., 2007. The tomato rhizosphere, and environment rich in nitrogen-fixing *Burkholderia* species with capabilities of interest for agriculture and bioremediation. *Applied and Environmental Microbiology*, 73, pp. 5308-5319. <https://doi.org/10.1128/AEM.00324-07>
- Casteblando, J., 2018. Técnicas de remediación de metales pesados con potencial aplicación en el cultivo de cacao. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 27, pp. 21-35. <https://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.02>
- Chang, Q., Diao, F., Wang, Q., Pan, L., Dang, Z. and Guo, W., 2018. Effects of arbuscular mycorrhizal symbiosis on growth, nutrient and metal uptake by maize seedlings (*Zea mays* L.) grown in soils spiked with Lanthanum and Cadmium. *Environmental Pollution*, 241, pp. 607-615. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.003>
- Cherian, S. and Oliveira, M., 2005. Transgenic plants in phytoremediation: Recent advances and new possibilities. *Environmental Science and Technology*, 39, pp. 9377-9390. <https://doi.org/10.1021/es051134I>
- Cornejo, P., Meier, S., Borie, G., Rilling, M. and Borie, F., 2008. Glomalin-related soil protein in a Mediterranean ecosystem affected by a copper smelter and its contribution to Cu and Zn sequestration. *Science of The Total Environment*, 406, pp. 154-6. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.07.04>
- Costa, F., Hernández, M. y Moreno, J., 1987. Factores limitantes de la utilización agrícola de los lodos residuales. In: *Utilización agrícola de los lodos de depuradora*. CSIC. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura. Murcia, España. pp. 41-60.

- Delgado-Oramas, B., 2020. La resistencia inducida como alternativa para el manejo de plagas en las plantas de cultivo. *Revista de Protección Vegetal*, 35, pp. e07. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.03.008>
- Díaz, G., Azcón, C. and Honrubia, M., 1996. Influence of arbuscular mycorrhizae on heavy metal (Zn and Pb) uptake and growth of *Lygeum spartum* and *Anthyllis cytisoides*. *Plant and Soil*, 180, pp. 241–249. <https://doi.org/10.1007/BF00015307>.
- Engelberth, J. and Engelberth, M., 2019. The costs of green leaf volatile-induced defense priming: temporal diversity in growth responses to mechanical wounding and insect herbivory. *Plants*, 8, pp. 23. <https://doi.org/10.3390/plants8010023>
- Firdaus, S., Van, A., Hidayati, N., Supena E., Visser, R. and Vosman, B., 2012. Resistance to *Bemisia tabaci* in tomato wild relatives. *Euphytica*, 187, pp. 31–45. <https://doi.org/10.1007/s10681-012-0704-2>
- Galán-Huertos, E. y Romero-Baena, A., 2008. Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *MACLA Revista de la Sociedad Español de Minerología*, 10, pp. 48-60. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6404529>
- Gil-Cardesa, L., Ferri, A., Cornejo, P. and Gómez, E., 2014. Distribution of chromium species in a Cr-polluted soil: Presence of Cr (III) in glomalin related protein fraction. *Science of The Total Environment*, 493, pp. 828–833. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.080>
- Giovannetti, M. and Mosse, B., 1980. An Evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytologist*, 84, pp. 489–500. <http://www.jstor.org/stable/2432123>
- González-Klenner, J., Albornoz, V., Ávila, G. and Verdugo, A., 2022. Tomato Defense against Whiteflies under Drought Stress: Non-Additive Effects and Cultivar-Specific Responses. *Plants*, 11, pp. 1049. <https://doi.org/10.3390/plants11081049>
- Gunathilakae, N., Yapa, N. and Hettiarachchi, R., 2018. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the cadmium phytoremediation potential of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms. *Groundwater for Sustainable Development*, 7, pp. 477-482. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.03.008>
- Hassan, E., Hijri, M. and St-Arnaud, M., 2013. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on trace metal uptake by sunflower plants grown on cadmium contaminated soil. *New Biotechnology*, 30, pp. 780-787. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2013.07.002>
- Hernández-Baranda, Y., Rodríguez, P., Peña, M., Meriño, Y. and Cartaya, O., 2019. Toxicidad del Cadmio en las plantas y estrategias para disminuir sus efectos. Estudio de caso: El tomate. *Cultivos Tropicales*, 40, pp. e09. <https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/1524>
- Hilje, L. and Morales, J., 2008. Whitefly Bioecology and Management in Latin America. In: J.L Capinera, ed. *Encyclopedia of Entomology*. Springer: Dordrecht. pp. 4250-4260.
- Järup, L., 2003. Peligros de contaminación por metales pesados. *Boletín Médico Británico*, 68, pp. 167-182. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldg032>
- Jiang, J., Moore, A., Priyadarshi, A. and Classen, T., 2017. Plant-mycorrhizal interactions mediate plant community coexistence by altering resource demand. *Ecology*, 98, pp. 187-197. <https://doi.org/10.1002/ecy.1630>
- Koza, A., Adedayo, A., Babalola, O. and Kappo, P., 2022. Microorganisms in plant growth and development: Roles in abiotic stress tolerance and secondary metabolites secretion. *Microorganisms*, 10, pp. 1528. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10081528>
- Kormanik, P. y McGraw, C., 1982. Cuantificación de micorrizas vesiculares-arbusculares en raíces de plantas. In: Schenk NC, ed. *Métodos y principios de investigación de micorrizas*. Sociedad Estadounidense de Fitopatología, Saint Paul, MN. pp. 37-46.
- Legesse, Y., Jida, M., Puente, M.L., Covacevich, F. and Belay, Z. 2024. Native mycorrhizae from Ethiopia improve tree growth and seedlings survival contributing to the green legacy program. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 27, pp. 131. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5373>
- Ley-Rivas, F., Sánchez, A., Ricardo, E. y Collazo, E., 2015. Efecto de cuatro especies de hongos micorrizógenos arbusculares en la

- producción de frutos de tomate. *Agronomía Costarricense*, 39, pp. 47-59. <https://doi.org/10.15517/rac.v39i1.19544>
- Liu, Y., Song, M., Almeida, N., Tilton, L., Cecava, J. and Stein, H., 2014. Energy concentration and amino acid digestibility in corn and corn coproducts from the wet-milling industry fed to growing pigs. *Journal of Animal Science*, 92, pp. 4557-65. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-6747>
- Locke, H. and Crawford, M., 2022. Arbuscular mycorrhizal fungi mediate how plant herbivory history influences herbivore performance. *Ecological Entomology*, 47, pp. 590-600. <https://doi.org/10.1111/een.13143>
- Meier, S., Borie, F., Bolan, N. and Cornejo, P., 2012. Phytoremediation of metal-polluted soils by arbuscular mycorrhizal fungi. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42, pp. 741-775. <https://doi.org/10.1080/10643389.2010.528518>
- Pérez-Moncada, A., Ramírez, M., Serralde, P., Peñaranda, M., Wilches, A., Ramírez, L. y Rengifo, A., 2019. Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) como estrategia para reducir la absorción de cadmio en plantas de cacao (*Theobroma cacao*). *Terra Latinoamericana*, 37, pp. 121-130. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.479>
- Pimienta-Barrios, E., Zañudo, J. y López, E., 2009. Efecto de las micorrizas arbusculares en el crecimiento, fotosíntesis y anatomía foliar de plantas jóvenes de Agave tequilana. *Acta Botánica Mexicana*, 89, pp. 63-78. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57412083005>
- Real-Santillán, O., Del-Val, E., Cruz, R., Contreras, Á., González, E. and Larsen, J., 2019. Increased maize growth and P uptake promoted by arbuscular mycorrhizal fungi coincide with higher foliar herbivory and larval biomass of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda*. *Mycorrhiza*, 29, pp. 615-622. <http://doi.org/10.1007/s00572-019-00920-3>
- Roy, M. and McDonald, M., 2015. Metal uptake in plants and health risk assessments in metal-contaminated smelter soils. *Land Degradation and Development*, 26, pp. 785-792. <https://doi.org/10.1002/ldr.2237>
- Santelices, R., Espinoza, S. and Cabrera, M. 2015., Effect of four levels of shade on survival, morphology and chlorophyll fluorescence of *Nothofagus alessandrii* container-grown seedlings. *iForest*, 8, pp. 638-641. <http://doi.org/10.3832/ifer1321-007>
- War, R., Paulraj, G., Ahmad, T., Buhroo, A., Hussain, B., Ignacimuthu, S. and Sharma, C., 2012. Mechanisms of plant defense against insect herbivores. *Plant Signaling and Behavior*, 7, pp. 1306-1320. <https://doi.org/10.4161/psb.21663>
- Zhao, H., Xia, B., Fan, C., Zhao, P. and Shen, S., 2012. Human health risk from soil heavy metal contamination under different land uses near Dabaoshan Mine, Southern China. *Science of The Total Environment*, 417-418, pp. 45-54. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.12.047>