

## Efecto de consorcios microbianos en el patosistema *Solanum lycopersicum* - *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*

### Effect of microbial consortia on the *Solanum lycopersicum* - *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* pathosystem

Mónica Lorena Limón-Corona<sup>1</sup> ,  
Alberto Flores-Olivas<sup>2\*</sup>,  
Francisco Daniel Hernández-Castillo<sup>2</sup> ,  
Ana María González-Merino<sup>3</sup> ,  
Susana González-Morales<sup>4</sup> ,  
Gil Virgen-Calleros<sup>5</sup>,  
Pedro Aarón Cerda-García<sup>6</sup>,  
Rufina Hernández-Martínez<sup>7</sup> 

<sup>1</sup> Doctorado en Ciencias en Parasitología Agrícola, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, CP. 25315. Saltillo, Coahuila, México.

<sup>2</sup> Departamento de Parasitología Agrícola, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, CP. 25315. Saltillo, Coahuila, México.

<sup>3</sup> Maestría en Ciencias en Parasitología Agrícola, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, CP. 25315. Saltillo, Coahuila, México.

<sup>4</sup> CONACYT-Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, CP. 25315. Saltillo, Coahuila, México.

<sup>5</sup> Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara, Camino Ramón Padilla Sánchez 2100, Nextipac, CP. 45220. Zapopan, Jalisco, México.

<sup>6</sup> Encore Biotechnology SA de CV, Pedro Infante 1615, Dep. 25, Desarrollo Urbano 3 Ríos, CP. 80020, Culiacán de Rosales, Sinaloa, México.

<sup>7</sup> Departamento de Microbiología, Centro de investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Km 107 Carretera Tijuana-Ensenada, CP. 22860, Ensenada, Baja California, México.

\* Autor de correspondencia:  
aflooli50@gmail.com

#### Nota científica

Recibido: 14 de diciembre 2021

Aceptado: 31 de octubre 2022

**Como citar:** Limón-Corona ML, Flores-Olivas A, Hernández-Castillo FD, González-Merino AM, González-Morales S, Virgen-Calleros G, Cerda-García PA, Hernández-Martínez R (2022) Efecto de consorcios microbianos en el patosistema *Solanum lycopersicum* - *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 9(3): e3221. DOI: 10.19136/era.a9n3.3221

**RESUMEN.** El objetivo fue evaluar el antagonismo *in vitro* de tres consorcios microbianos sobre tres cepas de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Fol) y su efecto en plántulas de tomate (*Solanum lycopersicum*) con síntomas de marchitez, bajo condiciones de invernadero. Se evaluaron los consorcios microbianos Soil Pro (SP), SOS<sup>®</sup> (SOS) y SSB<sup>®</sup> (SSB), de Liventia<sup>™</sup>; compuestos por bacterias, levaduras y micorrizas. Para determinar el antagonismo *in vitro* se utilizó la técnica de medio envenenado. En el invernadero se aplicaron los tres consorcios a plántulas de tomate inoculadas con Fol y se evaluaron: altura de la planta, diámetro del tallo, contenido de clorofila, peso seco de la biomasa aérea, peso seco de la raíz e incidencia y severidad de la marchitez. En la prueba en invernadero SP incrementó en 21% el crecimiento de las plántulas de tomate, respecto a severidad SP y SOS disminuyeron 37% el daño de las plántulas.

**Palabras clave:** Antagonismo *in vitro*, control biológico, incidencia y severidad, marchitez vascular del tomate, rizobacterias promotoras de crecimiento en plantas.

**ABSTRACT.** The objective was to evaluate the *in vitro* antagonism of three microbial consortia on three strains of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Fol) and their effect on tomato (*Solanum lycopersicum*) seedlings with wilt symptoms, under greenhouse conditions. The microbial consortia evaluated were Soil Pro (SP), SOS<sup>®</sup> (SOS) and SSB<sup>®</sup> (SSB), from Liventia<sup>™</sup>, composed of bacteria, yeasts and mycorrhizae. The poisoned medium technique was used to determine *in vitro* antagonism. In the greenhouse, the three consortia were applied to tomato seedlings inoculated with Fol and the following were evaluated: plant height, stem diameter, chlorophyll content, aerial biomass dry weight, root dry weight and wilt incidence and severity. In the greenhouse test, SP increased the growth of tomato seedlings by 21%, while SP and SOS reduced seedling damage by 37%.

**Key words:** Biological control, incidence and severity, *in vitro* antagonism, plant growth-promoting rhizobacteria, tomato wilt.

## INTRODUCCIÓN

*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Fol) causa la marchitez del tomate (*Solanum lycopersicum*), que disminuye el rendimiento y provoca la muerte de la planta (Holguín-Peña 2005). La principal estrategia de control es la aplicación de fungicidas, pero este método ofrece una efectividad parcial, ya que no controla el daño totalmente (McGovern 2015). Por esta razón se han buscado alternativas, una de ellas es el control biológico de patógenos mediante la aplicación de microorganismos benéficos en consorcios, los cuales tienen la característica de potenciar o complementar el efecto benéfico de las diferentes cepas compatibles (Bradáčová et al. 2019). Los consorcios microbianos pueden estar formados por rizobacterias promotoras de crecimiento en plantas (PGPR), las cuales son bacterias que colonizan la rizósfera de la planta, por lo que tienen interacción sinérgica o antagónica con otros microorganismos; dicha interacción se ha reportado que promueve el crecimiento de las plantas al disolver minerales y la defiende de diversos ataques de patógenos, al inducir la resistencia sistémica de la planta (Basu et al. 2021). Se han reportado varias especies de PGPR, entre ellas *Bacillus* spp. (Toffano et al. 2017), *Pseudomonas* spp. (Bubici et al. 2019), *Enterobacter cloacae* (Pattnaik et al. 2020), y *Acinetobacter* sp. (Piatetska et al. 2019). La levadura *Saccharomyces cerevisiae* se ha reportado como agente de biocontrol de hongos por la producción de compuestos volátiles (Toffano et al. 2017). Algunos consorcios contienen cepas del género *Glomus*, hongos micorrízicos que no tienen un efecto antifúngico como tal, pero actúan en simbiosis con la planta incrementando la superficie de absorción de agua y nutrientes, participan en la disolución de minerales, así como en la activación de genes de resistencia (Nair et al. 2015). El objetivo del presente trabajo fue evaluar el antagonismo *in vitro* de los consorcios microbianos, compuestos por *Pseudomonas* spp., *E. cloacae*, *Acinetobacter calcoaceticus*, *S. cerevisiae*, *Bacillus* spp. y *Glomus* spp. sobre Fol, y su efecto en plántulas de tomate con síntomas de marchitez, bajo condiciones de invernadero.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación del experimento

La investigación fue realizada en el laboratorio de Parasitología Molecular y en un invernadero de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Saltillo, Coahuila, México.

### Cepas de Fol

La determinación del antagonismo *in vitro* de los consorcios microbianos sobre Fol se llevó a cabo con las cepas Fol18, Fol19 y FolUA; pertenecientes al cepario del laboratorio de Parasitología Molecular, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

### Conorcios microbianos

Se utilizaron tres consorcios microbianos Soil Pro: *Pseudomonas fluorescens*  $3.5 \times 10^8$  UFC mL<sup>-1</sup>, *Pseudomonas putida*  $3.5 \times 10^8$  UFC mL<sup>-1</sup>, *Pseudomonas aeruginosa*  $2.0 \times 10^6$  UFC mL<sup>-1</sup>, *Acinetobacter calcoaceticus*  $1.0 \times 10^6$  UFC mL<sup>-1</sup>, *Enterobacter cloacae*  $0.5 \times 10^6$  UFC mL<sup>-1</sup>; SOS<sup>®</sup>: *P. fluorescens*  $3.5 \times 10^6$  UFC mL<sup>-1</sup>, *P. putida*  $1.5 \times 10^6$  UFC mL<sup>-1</sup>, *P. aeruginosa*  $2.0 \times 10^6$  UFC mL<sup>-1</sup>, *A. calcoaceticus*  $1.0 \times 10^6$  UFC mL<sup>-1</sup>, *E. cloacae*  $0.5 \times 10^6$  UFC mL<sup>-1</sup>, *Bacillus subtilis*  $2.0 \times 10^6$  UFC mL<sup>-1</sup>, *Bacillus licheniformis*  $1.5 \times 10^6$  UFC mL<sup>-1</sup>, *Bacillus thuringiensis*  $1.0 \times 10^6$  UFC mL<sup>-1</sup>, *Saccharomyces cerevisiae*  $0.5 \times 10^6$  UFC mL<sup>-1</sup>; y SSB<sup>®</sup>: *P. fluorescens*  $5.0 \times 10^6$  UFC mL<sup>-1</sup>, *P. putida*  $3.0 \times 10^6$  UFC mL<sup>-1</sup>, *P. aeruginosa*  $4.0 \times 10^6$  UFC mL<sup>-1</sup>, *A. calcoaceticus*  $2.0 \times 10^6$  UFC mL<sup>-1</sup>, *E. cloacae*  $1.0 \times 10^6$  UFC mL<sup>-1</sup>, *B. subtilis*  $4.0 \times 10^6$  UFC mL<sup>-1</sup>, *B. licheniformis*  $3.0 \times 10^6$  UFC mL<sup>-1</sup>, *B. thuringiensis*  $2.0 \times 10^6$  UFC mL<sup>-1</sup>, *S. cerevisiae*  $1.0 \times 10^6$  UFC mL<sup>-1</sup>, *Glomus aggregatum* 0.3 propágulos mL<sup>-1</sup>, *Glomus etunicatum* 0.3 propágulos mL<sup>-1</sup>, *Glomus intraradices* 0.3 propágulos mL<sup>-1</sup>, *Glomus mosseae* 0.3 propágulos mL<sup>-1</sup>. Para el cultivo de los microorganismos presentes en los consorcios se utilizó caldo Luria Bertani (LB) (extracto de levadura 5 g L<sup>-1</sup>, NaCl 5 g L<sup>-1</sup>, peptona de caseína 10 g L<sup>-1</sup>) (Jangir et al. 2018) y caldo papa dextrosa (infusión de papa 200 g L<sup>-1</sup>, dextrosa 20 g L<sup>-1</sup>) (Toffano et al. 2017). Se utilizaron tubos con 10 mL de caldo LB para el

crecimiento de bacterias del consorcio SP a tres dosis: 3.57 mL L<sup>-1</sup> (D1, 50% por debajo de la dosis recomendada por el fabricante), 7.14 mL L<sup>-1</sup> (D2, dosis recomendada por el fabricante), 10.71 mL L<sup>-1</sup> (D3, 50% por encima de la dosis recomendada por el fabricante) y tubos con 5 mL de caldo LB y 5 mL de caldo dextrosa papa para el crecimiento de bacterias y levaduras de SOS y SSB. Las dosis utilizadas para SOS fueron: 3.97 mL L<sup>-1</sup> (D1), 7.94 mL L<sup>-1</sup> (D2) y 11.90 mL L<sup>-1</sup> (D3), en el caso de SSB se usaron: 1.56 mL L<sup>-1</sup> (D1), 3.12 mL L<sup>-1</sup> (D2) y 4.68 mL L<sup>-1</sup> (D3). Los medios inoculados con los consorcios se incubaron a 30 °C durante 5 días para el desarrollo de bacterias (Jangir *et al.* 2018) y 7 días para el crecimiento de levaduras.

### Prueba de antagonismo *in vitro*

La preparación del medio envenenado con los consorcios microbianos consistió en la incubación de SP, SOS y SSB en los caldos LB y papa dextrosa a 30 °C durante 5 y 7 días, respectivamente. Después se colocaron en frascos que contenían 62 mL de medio PDA estéril, antes de ser vaciado a cuatro placas de Petri de 80 mm de diámetro. El medio se dejó solidificar y se incubó a 18 °C durante 7 días. Lo anterior se realizó para cada dosis del consorcio evaluado. Posteriormente, se colocó un disco de micelio de 10 mm de diámetro en el centro de cada placa de PDA correspondiente a cada una de las cuatro repeticiones. Las placas de PDA inoculadas se incubaron a 25 °C hasta que el micelio del control cubriera el total de la placa (Xu *et al.* 2020). Las pruebas se realizaron por duplicado tomando en cuenta el crecimiento radial de los hongos cada 24 h y el porcentaje de inhibición se calculó mediante la siguiente fórmula (modificada de Khalil *et al.* 2021):

$$PI = \left[ 1 - \left( \frac{CRME}{CRP} \right) \right] \times 100$$

Donde: PI = Porcentaje de inhibición del crecimiento radial, CRME = Crecimiento radial de Fol en el medio envenenado, y CRP = Crecimiento radial de Fol en PDA.

Para las mediciones se utilizó un vernier electrónico (Ultratech®) y los valores se registraron en

milímetros.

### Material vegetal

Se sembraron semillas de tomate variedad Floradade (Fax de Occidente), tipo bola, en charolas de poliestireno de 200 cavidades. El trasplante se realizó a los 21 días después de la siembra (dds), con una mezcla estéril de peat moss y perlita en proporción 3:1 (v/v) usando macetas de 1 L, para la evaluación de parámetros de crecimiento y de 3 L, para la prueba de incidencia y severidad. Las plantas se mantuvieron en invernadero a 28 ± 2 °C, la fertilización se realizó con solución Steiner (25 a 50%) (Cervantes-Vázquez *et al.* 2021).

### Parámetros de crecimiento en plántulas

Se realizaron ocho tratamientos con 10 réplicas, en un diseño completamente al azar. Se utilizaron plántulas variedad Floradade de 21 ddt, a las cuales se les aplicaron los siguientes tratamientos (T): T1 = SP 1.5 L ha<sup>-1</sup>, T2 = SOS 1.5 L ha<sup>-1</sup> y T3 = SSB 1.5 L ha<sup>-1</sup>, con seis aplicaciones radiculares cada 7 días; T4 = SP 1.5 L ha<sup>-1</sup> + Fol, T5 = SOS 1.5 L ha<sup>-1</sup> + Fol y T6 = SSB 1.5 L ha<sup>-1</sup> + Fol. Los consorcios microbianos se aplicaron 7 días antes de la inoculación con Fol, posteriormente se aplicaron de manera semanal (seis aplicaciones); T7 = plántulas inoculadas con Fol y T8 = plántulas control (sin inocular). La inoculación de las plántulas con el patógeno se realizó a los 15 días después del trasplante (ddt), con ayuda de una aguja estéril se hizo una herida a nivel de la corona, posteriormente se colocaron 20 mL de una suspensión de Fol de 1x10<sup>6</sup> conidios mL<sup>-1</sup> (Aimé *et al.* 2008). A los 43 días posteriores a la inoculación (dpi) se midieron los siguientes parámetros: altura de la planta, a partir de la base y hasta el ápice de crecimiento; diámetro del tallo, entre la primera y segunda hoja a partir de la base; contenido de clorofila en tres diferentes hojas (10 a 20 cm, 21 a 30 cm y 31 a 40 cm a partir de la base de la planta) con ayuda de un SPAD 502 Plus Minolta; peso seco de la biomasa aérea y peso seco de la raíz. Para determinar el peso seco se deshidrataron las muestras en un horno a 60 °C hasta peso constante. El parámetro de longitud se midió

en cm con una cinta métrica (Truper<sup>®</sup>), el diámetro en mm con un vernier electrónico (Ultratech<sup>®</sup>), y los pesos se registraron en g utilizando una balanza analítica (Ohaus<sup>®</sup>).

### **Incidencia y severidad de la marchitez**

Se analizaron seis tratamientos con seis repeticiones, en un diseño completamente al azar. Se utilizaron plántulas variedad Floradade de 21 ddt. Los inductores de resistencia sistémica fueron cuatro: SP 1.5 L ha<sup>-1</sup>, SOS 1.5 L ha<sup>-1</sup> y SSB 1.5 L ha<sup>-1</sup> con aplicación radicular y como inductor químico se utilizó Isotianil (Iso) 1.429 kg ha<sup>-1</sup> de manera foliar. En T1, T2, T3 y T4 se aplicaron los inductores 7 días antes de cada inoculación con Fol (posteriormente se aplicaron seis veces de manera semanal), el T5 fueron las plántulas inoculadas con Fol y el T6 las plántulas control. La inoculación de las plántulas se realizó a los 15 y 22 ddt, con ayuda de una aguja estéril se hizo una herida a nivel de la corona, posteriormente se colocaron 10 mL de una suspensión de Fol de 1x10<sup>6</sup> conidios mL<sup>-1</sup> (Aimé et al. 2008). La incidencia y severidad se evaluaron tomando en cuenta la fecha de la primera inoculación: 15, 22, 29, 36 y 43 dpi. El porcentaje de incidencia se calculó contando el número de plántulas enfermas entre el total de plántulas evaluadas por 100. El nivel de severidad fue estimado de acuerdo a la escala de Diener y Ausubel (2005) donde: 0 = planta muerta (100%), 1 = hojas viejas muertas y hojas jóvenes severamente atrofiadas (80%), 2 = hojas viejas cloróticas o muertas y hojas jóvenes atrofiadas (60%), 3 = hojas viejas con clorosis vascular y hojas jóvenes con crecimiento detenido (40%), 4 = peciolo de las hojas atrofiados (20%), 5 = plantas sin síntomas (0%) (Rivera-Solís et al. 2021).

### **Análisis estadístico**

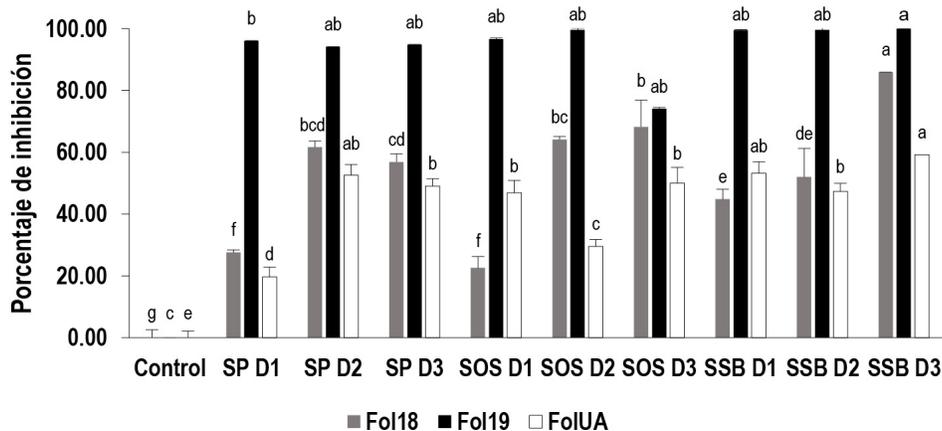
Con los datos del antagonismo *in vitro* y parámetros de crecimiento se realizó un análisis de varianza y comparación de medias de Tukey (P < 0.05). A los datos de incidencia y severidad se les realizaron análisis no paramétricos de Kruskal-Wallis y Mann-Witney con el software estadístico Minitab 19.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Prueba de antagonismo *in vitro***

Los controles de Fol18, Fol19 y FolUA cubrieron la superficie total de la placa de PDA 10 días después de incubación. Sin embargo, en los tratamientos, el crecimiento radial registró un rango de 0 a 56.13 mm en SSB D3 con Fol19 y en SP D1 con FolUA, respectivamente. Los tres consorcios microbianos en las tres dosis evaluadas mostraron un porcentaje de inhibición con diferencia estadísticamente significativa respecto al control. No obstante, el consorcio microbiano SSB D3 presentó el porcentaje de inhibición más alto sobre las tres cepas de Fol evaluadas, el cual fue de 59.22 al 100% (Figura 1).

Es fundamental evaluar el nivel de antagonismo de microorganismos benéficos en ambientes controlados, lo cual es un indicador de potencial uso de estos microorganismos en condiciones de campo. El consorcio SSB obtuvo el mayor porcentaje de inhibición para las tres cepas de Fol evaluadas, lo cual podría deberse a su formulación, ya que está conformado por bacterias y levaduras cultivables como *Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp., *E. cloacae*, *A. calcoaceticus* y *S. cerevisiae*; mientras SP, que obtuvo el menor porcentaje de inhibición, solo contiene: *Pseudomonas* spp., *E. cloacae* y *A. calcoaceticus*. Por lo tanto, un mayor resultado inhibitorio sobre Fol podría relacionarse a un efecto conjunto de enzimas como la β-1,3-glucanasa (Bubici et al. 2019) y compuestos antifúngicos como surfactina, iturina y fengycin (Cao et al. 2018) producidos por *Bacillus* spp. y los compuestos volátiles como 3-metil-1-butanol y el 2-metil-1-butanol (Toffano et al. 2017) liberados por *S. cerevisiae*. De igual manera se ha reportado un mayor nivel de antagonismo de *Bacillus* spp. y *S. cerevisiae* comparado con *Pseudomonas* spp. y *Enterobacter* spp. (Palmieri et al. 2017), debido a que los principales efectos benéficos de estos dos últimos géneros son la producción de ácido indolacético (Mellidou et al. 2021) y disolución de minerales (Basu et al. 2021), lo cual promueve el crecimiento de las plantas. Aunado a esto, la concen-



**Figura 1.** Porcentaje de inhibición de SP, SOS y SSB a tres dosis diferentes (D1, D2 y D3), sobre Fol18, Fol19 y FolUA. Las medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ). La línea encima de las barras representa la desviación estándar.

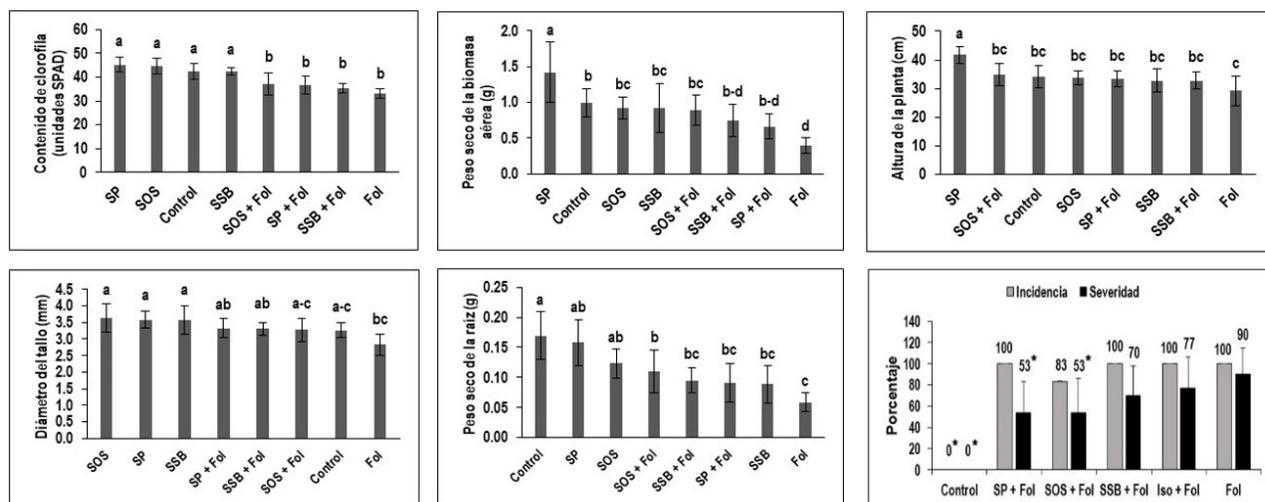
tración de microorganismos benéficos es mayor en SSB con respecto a SP y SOS. Debido a que los consorcios microbianos son formulaciones no es posible evaluar el efecto individual de cada especie, pero se infiere que, en el antagonismo *in vitro* de los consorcios microbianos sobre Fol, los principales mecanismos de biocontrol son la competencia por nutrientes, la producción de compuestos volátiles que inhiben el crecimiento de Fol y la antibiosis, por la producción de enzimas que degradan la pared fúngica.

### Parámetros de crecimiento en plántulas

La altura de planta fue estadísticamente mayor en el tratamiento SP (41.72 cm) con respecto, al control, mientras que para el resto de los tratamientos no se encontraron diferencias. Aunque el diámetro del tallo mostró un mayor valor en los tratamientos SOS, SP, y SSB, con 3.63, 3.58 y 3.58 mm, respectivamente, estos no fueron estadísticamente diferentes al control. Para nivel de clorofila se observaron dos grupos estadísticamente diferentes, el primero integrado por SP, SOS, control y SSB; y el segundo por el resto de tratamientos. El peso seco de la biomasa aérea registró que el tratamiento SP con 1.42 g, mostró diferencia estadística con respecto al control, mientras que el resto de tratamientos fueron iguales al control, excepto Fol con 0.40 g. El peso seco de la raíz mostró un valor mayor para el control con 0.17

g, sin embargo, no fue estadísticamente diferente a SP y SOS con 0.16 y 0.12 g, respectivamente; mientras que el resto de tratamientos fueron diferentes al control (Figura 2).

El mejor tratamiento para altura de la planta, contenido de clorofila y peso seco de la biomasa aérea, fue el de SP. Estos datos son similares a lo reportado para *Pseudomonas* spp. que incrementó la altura de la planta, el peso seco de los brotes, el número de frutos y el rendimiento de plantas de tomate (Almaghrabi *et al.* 2013); debido probablemente a la producción de ácido indolacético, el cual promueve la elongación, división y diferenciación celular (Muñoz *et al.* 2021). De igual manera *Pseudomonas* sp. produce sideróforos y disuelve fosfatos, lo que promueve el crecimiento de plantas de tomate (Mellidou *et al.* 2021). También se ha reportado que *E. cloacae* incrementó el porcentaje de germinación de semillas y el crecimiento de plantas de tomate bajo estrés hídrico, gracias a la disolución de fosfatos (Eke *et al.* 2019) además, en alfalfa mejora la altura de la planta y el peso seco, debido no solo a la disolución de dichos minerales, sino también a la producción de acetoina (Khalifa *et al.* 2016). Por su parte los metabolitos producidos por *A. calcoaceticus* incrementaron entre 11.3 y 145% el rendimiento de plantas de tomate (Piatetska *et al.* 2019). A su vez, SOS y SSB, mostraron algunos parámetros mayores



**Figura 2.** Parámetros de crecimiento, incidencia y severidad de marchitez en plántulas tratadas con SP, SOS, SSB, SP + Fol, SOS + Fol, SSB + Fol, Iso + Fol y Fol. Las medias con la misma letra no son estadísticamente diferentes según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ). \*Existe diferencia estadísticamente significativa en los tratamientos con respecto a Fol, de acuerdo a las pruebas de Kruskal-Wallis y Mann-Witney ( $p < 0.05$ ). La línea encima de las barras representa la desviación estándar.

al control, aunque las diferencias no fueron estadísticamente significativas en la mayoría de parámetros, excepto SSB que obtuvo valores estadísticamente menores al control. De acuerdo a lo anterior, la mejor formulación para un consorcio microbiano promotor de crecimiento es SP. Esto demuestra que no siempre se potencia el efecto conjunto de las especies de las que está compuesto un consorcio microbiano y varía su efecto en los distintos modelos biológicos en los que son aplicados (Sarma *et al.* 2015, Samaras *et al.* 2021).

### Incidencia y severidad de la marchitez

La incidencia de marchitez fue del 100% en todos los tratamientos, excepto en SOS, donde fue del 83%. El mayor nivel de severidad fue para el tratamiento Fol (90%), mientras que el nivel de daño disminuyó en Iso (77%), SSB (70%), SP (53%) y SOS (53%). El análisis estadístico mostró diferencias entre las plántulas solo inoculadas con Fol con respecto de las plántulas que fueron tratadas con SP y SOS y posteriormente inoculadas con Fol (Figura 2).

Los resultados en invernadero mostraron disminución de la incidencia de la marchitez vascular en plantas de tomate tratadas con SOS y disminución

de la severidad en los tratamientos con SP y SOS. Lo anterior debido probablemente a las concentraciones de las PGPR y *S. cerevisiae* de estos consorcios con respecto a SSB (Sarma *et al.* 2015), ya que la formulación de cada consorcio es diferente y por lo tanto podría haber mejor adaptación de algunas cepas a un determinado modelo biológico (Bradáčová *et al.* 2019). Los microorganismos de los que están compuestos SP y SOS, a los que se les atribuye el control sobre Fol, son *Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp., *E. cloacae*, *A. calcoaceticus* y *S. cerevisiae*. Existen diversas investigaciones sobre el control que ejercen estos microorganismos benéficos por producción de enzimas como  $\beta$ -1,3-glucanasa, proteasa y quitinasa, que degradan la pared fúngica (Jangir *et al.* 2018, Bubici *et al.* 2019), compuestos volátiles y antifúngicos que inhiben el crecimiento del hongo (Toffano *et al.* 2017, Cao *et al.* 2018, Jangir *et al.* 2018, Pattnaik *et al.* 2020). De la misma manera, estos microorganismos benéficos inducen la resistencia sistémica de la planta al estimular la expresión de genes de resistencia (Basu *et al.* 2021), como lo reportan Samaras *et al.* (2021), donde *Bacillus subtilis* indujo la expresión de los genes LOXD, CHI3 y PAL activados por la vía del ácido jasmónico, así como PR-1A y GluA activa-

dos por la vía del ácido salicílico, lo cual disminuye la marchitez del tomate ocasionada por *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*. Se ha informado el control que ejercen diversos consorcios microbianos sobre *F. oxysporum* en diferentes cultivos, Palmieri et al. (2017) reportaron que el consorcio microbiano conformado por *Serratia marcescens*, *Pseudomonas fluorescens*, *Rahnella aquatilis* y *Bacillus amyloliquefaciens* incrementó en 90% la supervivencia de plantas de garbanzo inoculadas con *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* con respecto al control inoculado. A su vez, Srivastava et al. (2010) analizaron el consorcio compuesto por *Pseudomonas*, *Trichoderma harzianum* y *Glomus intraradices* para el control de Fol, como resultado estos microorganismos redujeron la incidencia y la severidad de la marchitez

vascular del tomate entre 77 y 67% en los ensayos en invernadero y campo, respectivamente; también incrementaron el rendimiento un 20% con respecto al control.

Los consorcios microbianos evaluados presentan un efecto antagónico sobre Fol, destacando SSB D3 como el que se desempeñó mejor en las pruebas de antagonismo *in vitro* con un porcentaje de inhibición mayor. De manera similar, los consorcios microbianos promueven el crecimiento de las plántulas de tomate y reducen el daño por Fol, siendo SP y SOS los que mostraron los mejores resultados. Por lo anterior, SP, SOS y SSB muestran un uso potencial para producción de plántulas de tomate y la aplicación en cultivos comerciales, como parte de un manejo integrado de plagas y enfermedades.

#### LITERATURA CITADA

- Aimé S, Cordier C, Alabouvette C, Olivain C (2008) Comparative analysis of PR gene expression in tomato inoculated with virulent *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* and the biocontrol strain *F. oxysporum* Fo47. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 73: 9-15.
- Almaghrabi OA, Massoud SI, Abdelmoneim TS (2013) Influence of inoculation with plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on tomato plant growth and nematode reproduction under greenhouse conditions. *Saudi journal of biological sciences* 20: 57-61.
- Basu A, Prasad P, Das SN, Kalam S, Sayyed RZ, Reddy MS, El Enshasy H (2021) Plant growth promoting Rhizobacteria (PGPR) as green bioinoculants: Recent developments, constraints, and prospects. *Sustainability* 13(3): 1140. DOI: 10.3390/su13031140.
- Bradáčová K, Florea AS, Bar-Tal A, Minz D, Yermiyahu U, Shawahna R, Kraut-Cohen J, Zolti A, Erel R, Dietel K, Weinmann M, Zimmermann B, Berger N, Ludewig U, Neumann G, Pošta G (2019) Microbial consortia versus single-strain inoculants: An advantage in PGPM-assisted tomato production? *Agronomy* 9(2): 105. DOI: 10.3390/agronomy9020105.
- Bubici G, Kaushal M, Prigigallo MI, Gómez-Lama CC, Mercado-Blanco J (2019) Biological control agents against *Fusarium* wilt of banana. *Frontiers in Microbiology* 10: 616. DOI: 10.3389/fmicb.2019.00616.
- Cao Y, Pi H, Chandransu P, Li Y, Wang Y, Zhou H, Xiong H, Helmann JD, Cai Y (2018) Antagonism of two plant-growth promoting *Bacillus velezensis* isolates against *Ralstonia solanacearum* and *Fusarium oxysporum*. *Scientific Reports* 8: 4360. DOI: 10.1038/s41598-018-22782-z.
- Cervantes-Vázquez TJÁ, Valenzuela-García AA, Cervantes-Vázquez MG, Guzmán-Silos TL, Fortiz EL, Rangel PP, Rueda-Puente EO (2021) Morphophysiological, enzymatic, and elemental activity in greenhouse tomato saladette seedlings from the effect of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria. *Agronomy* 11: 1008. DOI: 10.3390/agronomy11051008.
- Diener AC, Ausubel FM (2005) Resistance to *Fusarium oxysporum* 1, a dominant Arabidopsis disease-resistance gene, is not race specific. *Genetics* 171: 305-321.

- Eke P, Kumar A, Sahu KP, Wakam LN, Sheoran N, Ashajyothi M, Patel A, Boyom FF (2019) Endophytic bacteria of desert cactus (*Euphorbia trigonas* Mill) confer drought tolerance and induce growth promotion in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Microbiological Research* 228: 126302. DOI: 10.1016/j.micres.2019.126302.
- Holguín-Peña RJ (2005) *Fusarium* wilt of tomato caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* Race 3 in Baja California Sur, Mexico. *Plant Disease* 89: 1360-1360.
- Jangir M, Pathak R, Sharma S, Sharma S (2018) Biocontrol mechanisms of *Bacillus* sp. isolated from tomato rhizosphere, against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. *Biological Control* 123: 60-70.
- Khalifa AY, Alsyeeh AM, Almalki MA, Saleh FA (2016) Characterization of the plant growth promoting bacterium, *Enterobacter cloacae* MSR1, isolated from roots of non-nodulating *Medicago sativa*. *Saudi Journal of Biological Sciences* 23: 79-86.
- Khalil MMR, Fierro-Coronado RA, Peñuelas-Rubio O, Villa-Lerma AG, Plascencia-Jatomea R, Félix-Gastélum R, Maldonado-Mendoza IE (2021) Rhizospheric bacteria as potential biocontrol agents against *Fusarium* wilt and crown and root rot diseases in tomato. *Saudi Journal of Biological Sciences* 28: 7460-7471.
- McGovern RJ (2015) Management of tomato diseases caused by *Fusarium oxysporum*. *Crop Protection* 73: 78-92.
- Mellidou I, Ainalidou A, Papadopoulou A, Leontidou K, Genitsaris S, Karagiannis E, Van de Poel B, Karamanoli K (2021) Comparative transcriptomics and metabolomics reveal an intricate priming mechanism involved in PGPR-mediated salt tolerance in tomato. *Frontiers in Plant Science* 12: 713984. DOI: 10.3389/fpls.2021.713984.
- Muñoz TP, Cárdenas S, Arismendi MM, Huanacuni N, Huanca-Mamani W, Cifuentes D, Sepúlveda CGF (2021) The endophytic *Pseudomonas* sp. S57 for plant-growth promotion and the biocontrol of phytopathogenic fungi and nematodes. *Plants* 10(8): 1531. DOI: 10.3390/plants10081531.
- Nair A, Kolet SP, Thulasiram HV, Bhargava S (2015) Role of methyl jasmonate in the expression of mycorrhizal induced resistance against *Fusarium oxysporum* in tomato plants. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 92: 139-145.
- Palmieri D, Vitullo D, De Curtis F, Lima G (2017) A microbial consortium in the rhizosphere as a new biocontrol approach against fusarium decline of chickpea. *Plant Soil* 412: 425-439.
- Pattnaik S, Dash D, Mohapatra S, Pattnaik M, Marandi AK, Das S, Samantaray DP (2020) Improvement of rice plant productivity by native Cr (VI) reducing and plant growth promoting soil bacteria *Enterobacter cloacae*. *Chemosphere* 240: 124895. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.124895.
- Piatetska D, Leonova N, Pirog T, Klymenko N (2019) Yield of tomatoes and peppers under the influence of *Nocardia vaccinii* IMV B-7405, *Acinetobacter calcoaceticus* IMV B-7241 and *Rhodococcus erythropolis* IMV Ac-5017. *Journal of Agriculture and Environment* 3(11): 1-7. DOI: 10.23649/jae.2019.3.11.4.
- Rivera-Solís LL, Rodríguez-Jasso RM, Flores-López ML, Robledo-Olivo A, Sandoval-Rangel A, Sariñana-Aldaco O, González-Morales S (2021) Extractos de *Sargassum* spp. como inductores de tolerancia a *Fusarium oxysporum* en plántulas de tomate. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 8(1): e2826. DOI: 10.19136/era.a8n1.2826.
- Samaras A, Roumeliotis E, Ntasiou P, Karaoglanidis G (2021) *Bacillus subtilis* MBI600 Promotes Growth of Tomato Plants and Induces Systemic Resistance Contributing to the Control of Soilborne Pathogens. *Plants* 10(6): 1113. DOI: 10.3390/plants10061113.

- Sarma BK, Yadav SK, Singh S, Singh HB (2015) Microbial consortium-mediated plant defense against phytopathogens: readdressing for enhancing efficacy. *Soil Biology and Biochemistry* 87: 25-33.
- Srivastava R, Khalid A, Singh US, Sharma AK (2010) Evaluation of arbuscular mycorrhizal fungus, fluorescent *Pseudomonas* and *Trichoderma harzianum* formulation against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* for the management of tomato wilt. *Biological control* 53: 24-31.
- Toffano L, Fialho MB, Pascholati SF (2017) Potential of fumigation of orange fruits with volatile organic compounds produced by *Saccharomyces cerevisiae* to control citrus black spot disease at postharvest. *Biological Control* 108: 77-82.
- Xu W, Wang K, Wang H, Liu Z, Shi Y, Gao Z, Wang Z (2020) Evaluation of the biocontrol potential of *Bacillus* sp. WB against *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum*. *Biological Control* 147: 104288. DOI: 10.1016/j.biocontrol.2020.104288.