



Biocontrol de *Fusarium oxysporum* y promoción del crecimiento en Chile con *Bacillus cereus* y *B. thuringiensis*

Maribel Mendoza-Alatorre¹, Aldo Gutiérrez-Chávez¹, Angélica Anahí Acevedo-Barrera¹, Loreto Robles-Hernández¹, Jared Hernández-Huerta^{1*}. ¹Laboratorio de Microbiología Aplicada, Fitopatología y Fisiología Postcosecha, Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Campus I s/n, Chih., Chihuahua, CP 31350, México.

*Autor de correspondencia
Jared Hernández-Huerta
jahuerta@uach.mx

Sección:
Número Especial

Recibido:
20 Noviembre, 2024
Aceptado:
22 Mayo, 2025
Publicado:
06 Junio, 2025

Cita:
Mendoza-Alatorre M,
Gutiérrez-Chávez A, Acevedo-
Barrera AA, Robles-Hernández
L y Hernández-Huerta J. 2025.
Biocontrol de *Fusarium
oxysporum* y promoción del
crecimiento en Chile con
Bacillus cereus y *B.
thuringiensis*. Revista
Mexicana de Fitopatología
43(4): 71.
[https://doi.org/10.18781/R.ME
X.FIT.2024-15](https://doi.org/10.18781/R.ME.X.FIT.2024-15)

RESUMEN

Antecedentes/Objetivo. *Fusarium oxysporum* es causante de la marchitez del Chile y una estrategia ecológica para su manejo puede ser el uso de *Bacillus* spp. ya que han demostrado ser biocontrol de hongos fitopatógenos y promotores de crecimiento vegetal (PCV). El objetivo fue evaluar la capacidad de biocontrol y PCV de *B. cereus* y *B. thuringiensis*, y su efecto sobre variables morfológicas del Chile jalapeño y reducción de la severidad de la marchitez.

Materiales y Métodos. Se realizaron pruebas de patogenicidad y virulencia en plántulas de Chile jalapeño con seis cepas de *F. oxysporum* aisladas de plantas de Chile. Se realizaron pruebas de antagonismo *in vitro* entre las cepas nativas de *B. cereus* Bc28-2 (Bc28-2), *B. cereus* Bc28-5 (Bc28-5) y *B. thuringiensis* Bt24 (Bt24), empleando como control *Bacillus subtilis* QST713 (PC), contra las cepas de *F. oxysporum*. Se realizaron pruebas de PCV en plántulas de Chile con las cepas de *Bacillus*. Asimismo, se realizaron pruebas de biocontrol de *Bacillus* contra *F. oxysporum* FL2, en condiciones de invernadero. Los datos se analizaron mediante ANOVAs y pruebas de separación de medias ($p < 0.05$) y un análisis multivariado de componentes principales.

Resultados. Todas las cepas de *F. oxysporum* fueron patógenas con una incidencia del 100 % y una severidad del 89.9 %. PC logró la mayor degradación de esporas de *Fusarium* (86.7 %), seguido de Bc28-2 y Bc28-5 (84.2 %). Bt24 y Bc28-2 promovieron el mejor desarrollo de las plántulas de Chile, con incrementos en parámetros vegetativos. En el biocontrol de *F. oxysporum* FL2, Bc28-2 y Bc28-5 redujeron la severidad de la enfermedad en un 60.4 % y promovieron el crecimiento similar al control, mientras que Bt24 no mostró eficacia en el biocontrol de la marchitez.

Conclusiones. Los resultados indican el potencial de *Bacillus cereus* Bc28-2 y Bc28-5 como biocontroles de *F. oxysporum* en Chile jalapeño, aunque es necesario validar su efectividad en campo y explorar su integración en el manejo agrícola sostenible.

Palabras clave: *Bacillus*, Promoción del crecimiento, Biocontrol, Chile, Antagonismo



INTRODUCCIÓN

El chile (*Capsicum annuum*) es la tercera hortaliza más cultivada y consumida a nivel mundial, con gran importancia económica en países productores como México (Lozana *et al.*, 2022; Bobadilla-Larios *et al.*, 2017). En 2023, la producción de chile en México alcanzó 3,681,061.47 t, con un valor de 45,997.65 millones de pesos (SIAP, 2023). Sin embargo, el rendimiento del cultivo se ve amenazado por diversos factores bióticos, entre los que destacan las enfermedades fúngicas.

Las especies del género *Fusarium* representan una de las principales amenazas fitosanitarias para el cultivo de chile, causando enfermedades como la marchitez y pudrición radicular, que pueden generar pérdidas severas en la producción (Sam-on *et al.*, 2024; Gabrekiristos y Demiyo, 2020). Entre estas enfermedades, la marchitez causada por *Fusarium oxysporum* es una de las más destructivas, ya que puede reducir el rendimiento del cultivo entre un 68 y 71 % (Sam-on *et al.*, 2024; Adina *et al.*, 2021; Gabrekiristos y Demiyo, 2020). Esto se debe a que el hongo coloniza el sistema vascular, obstruye el transporte de agua y nutrientes, lo que resulta en un debilitamiento progresivo y, en muchos casos, la muerte de las plantas afectadas (Bashir *et al.*, 2018).

La persistencia de *Fusarium* en el suelo y su capacidad para formar estructuras de resistencia complica su control, convirtiéndolo en un problema recurrente en las zonas productoras de chile (Campbell, 1990). El control de *Fusarium* se ha basado principalmente en el uso de fungicidas químicos, cuya aplicación indiscriminada ha generado problemas ambientales, resistencia de los fitopatógenos y riesgos para la salud humana (Shaheen *et al.*, 2021; Sela-Burlage *et al.*, 2001). Como alternativa sostenible, se ha propuesto el uso de microorganismos benéficos con capacidad de biocontrol y promoción del crecimiento vegetal. En este contexto, el género *Bacillus* ha demostrado ser una opción viable debido a su capacidad de producir compuestos antimicrobianos, inducir resistencia en plantas contra fitopatógenos y mejorar el desarrollo vegetal (Tiware *et al.*, 2019; Shafi *et al.*, 2017). Diferentes especies de *Bacillus* han mostrado efectos prometedores en el control de *Fusarium* spp. y en la promoción del crecimiento vegetal. Por ejemplo, *Bacillus subtilis* QST713 ha demostrado inhibir el crecimiento de *F. oxysporum* mediante la producción de antibióticos lipopeptídicos, como iturinas y fengicinas (Kulkova *et al.*, 2023; Zhou *et al.*, 2021). Asimismo, *B. amyloliquefaciens* FZB42 induce resistencia sistémica en jitomate y chile, produciendo surfactinas que inhiben el crecimiento de *Fusarium* sp. (Chowdhury *et al.*, 2015). Además, *B. velezensis* S3-1 suprime infecciones de *Fusarium* spp. mediante la producción de bacilomicinas y la activación de mecanismos de defensa en la planta (Antil *et al.*, 2022, Kumar *et al.*, 2020).

Por otro lado, *B. cereus* se ha reportado como un agente de biocontrol eficaz contra *Fusarium* spp., promoviendo el crecimiento vegetal mediante la solubilización de fósforo y la producción de ácido indolacético (Malik *et al.*, 2022; Yanti *et al.*, 2017). Cepas como *B. cereus* SLBE.1AP han mostrado actividad antifúngica y promotoras del crecimiento de plántulas de chile (Yanti *et al.*, 2021), mientras que *B. cereus* EC9 en jitomate han inducido una respuesta de defensa sistémica en las plantas (Pazarlar *et al.*, 2022). De igual manera, *B. cereus* NK91 fue caracterizado y se encontró que es capaz de producir quitinasas que ayudan al control *in vitro* de *F. oxysporum* (Thakur *et al.*, 2022). Por su parte, *B. thuringiensis*, ha sido evaluado no solo por su acción insecticida, sino también como promotor de crecimiento en cultivos hortícolas, induciendo incrementos en biomasa, altura de plantas debido a la producción de fitohormonas y sideróforos (Hyder

et al., 2020; Jo et al., 2020; Praça et al., 2012). Cepas como *B. thuringiensis* CHGP12 han mostrado efectividad en el control de *F. oxysporum* por la producción de lipasas (Fatima et al., 2023), mientras que *B. thuringiensis* IBRC-M11096 induce respuestas de defensa en jitomate (Zibanezhadian et al., 2020).

Sin embargo, el uso de *B. cereus* y *B. thuringiensis* como agentes de biocontrol y promotores de crecimiento vegetal (PCV) en chile jalapeño aún no ha sido suficientemente estudiado. Esto es especialmente relevante considerando que las cepas utilizadas en este estudio son nativas del suelo de la región productora de chile, específicamente de la zona centro-sur del estado de Chihuahua. Esta característica podría conferirles una mayor capacidad de adaptación y efectividad contra patógenos locales como *F. oxysporum*. Además, identificar microorganismos con propiedades de biocontrol y PCV originarios de la misma zona de producción pueden representar una estrategia más eficiente y sostenible para el manejo de la marchitez por *Fusarium oxysporum* en chile jalapeño. A partir de esta premisa, se hipotetiza que la aplicación de *B. cereus* y *B. thuringiensis* reducirá la severidad de la marchitez por *Fusarium oxysporum* y promoverá el crecimiento del chile jalapeño en condiciones de invernadero. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar la capacidad de biocontrol y PCV de *B. cereus* y *B. thuringiensis*, así como su efecto sobre variables morfológicas del chile jalapeño y la reducción de la severidad de la marchitez. Los hallazgos de este estudio proporcionarán evidencia sobre el potencial de estos microorganismos como alternativas ecológicas al control químico, contribuyendo a estrategias de manejo sostenible del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron como agentes potenciales de biocontrol y PCV cepas de *Bacillus cereus* Bc28-2 (Bc28-2), *B. cereus* Bc28-5 (Bc28-5) y *B. thuringiensis* Bt24 (Bt24), aisladas de suelo en la región productora de chile jalapeño de Lázaro Cárdenas, Municipio de Meoqui, Chihuahua, y pertenecientes al Laboratorio de Microbiología Aplicada, Fitopatología y Fisiología Poscosecha (MAFFP) de la Facultad de Ciencias Agrotecnológicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH) (Hernández-Huerta et al., 2023). Como control positivo se empleó la cepa comercial de *Bacillus subtilis* QST713 (PC) del producto Serenade®.

Se utilizaron las cepas de *Fusarium oxysporum* FM1, FM2, FL1, FL5, FL6 y FL2, pertenecientes al laboratorio MAFFP. Estas cepas fueron aisladas de plantas de chile jalapeño con sintomatología característica de la marchitez en la zona agrícola productora de chile del Distrito de Riego 005 de Delicias, Chihuahua. Para los ensayos se utilizaron semillas de chile jalapeño cultivar M (Southern Star Seeds S. de R.L. de C.V., México). Este cultivar es una variedad comercial común en la zona productora de chile de donde se obtuvieron los microorganismos.

Preparación del inóculo bacteriano. Las cepas de *Bacillus* se cultivaron en caldo nutritivo (CN; BD Difco Laboratories, Sparks Maryland, MD, USA) durante 72 h a 28 °C. Posteriormente, las suspensiones bacterianas fueron centrifugadas a 7,000 rpm durante 10 min a 4 °C, descartándose el sobrenadante. El pellet resultante se resuspendió en 20 mL de solución salina estéril al 0.85 %, ajustándose a una concentración de 1×10^8 UFC mL⁻¹ correspondiente a una densidad óptica de 0.4 a 600 nm (Chandrasekaran et al., 2017).

Preparación de suspensiones de esporas de *Fusarium*. Las suspensiones de esporas se obtuvieron cultivando los hongos en agar de papa y dextrosa (PDA; BD Difco Laboratories, Sparks Maryland, MD, USA) por 7 días a 28 °C. Las esporas fueron recolectadas mediante raspado y filtrado con fibra de vidrio estéril. Posteriormente, la concentración de esporas se ajustó a 1×10^6 esporas mL^{-1} utilizando una cámara de Neubauer (Weber Scientific International Ltd., Teddington, UK).

Pruebas de patogenicidad y virulencia de cepas de *Fusarium*. Esta prueba se realizó durante la etapa de germinación de semillas de chile jalapeño bajo condiciones *in vitro*. Las semillas se desinfectaron con NaClO al 4 % (v/v) en agitación durante 5 min, seguido de tres lavados con agua destilada estéril de 5 min cada uno. Posteriormente, las semillas estériles se sumergieron en suspensiones de esporas fúngicas y se agitaron a 120 rpm por 20 min. Tras la inoculación, las semillas se secaron y se colocaron en cajas Petri que tenían papel estéril húmedo, y se colocaron cinco semillas por caja. Las cajas fueron selladas y colocadas en un cuarto de crecimiento con un fotoperiodo de 16 h luz a 28 °C y 8 h oscuridad a 18 °C.

La incidencia de la enfermedad se evaluó en porcentaje de semillas infectadas por caja y el índice de severidad (IS) se determinó a los 10 días después de la inoculación, utilizando la escala de Robles-Hernández *et al.* (2015): 0= semilla germinada asintomática, 1=semilla con crecimiento de micelio sobre la cubierta seminal, 2=puntos necróticos aislados y/o lesiones necróticas de 1 a 5 mm, 3=lesiones necróticas de 6-10 mm y 4=semillas germinadas con necrosis total, lesiones necróticas de más de 11 mm o plántulas con hipocótilo necrosado. El IS fue calculado mediante la fórmula propuesta por Galanihe *et al.* (2004).

$$IS = \sum \left[\frac{PQ}{MN} \right] \times 100$$

donde IS= índice de severidad, P= categoría de severidad, Q= número de plantas en la misma categoría, M=número total de plantas observadas, N=número máximo de la escala de valoración.

Para determinar el comportamiento de la enfermedad provocado por cada hongo en el transcurso del tiempo, se calculó el área bajo la curva del desarrollo de la enfermedad (ABCDE) con la fórmula propuesta por Saner y Finney (1997) y el método de Campbell y Madden (1990).

El ensayo se estableció bajo un diseño completamente al azar (DCA) con cuatro repeticiones por tratamiento (cajas Petri con semillas inoculadas). Los tratamientos fueron soluciones de esporas fúngicas y como control se empleó agua destilada estéril.

Prueba de confrontación de *Bacillus* vs *Fusarium* *in vitro*. La confrontación se realizó en microplacas estériles de 96 pocillos (Biologix Steril 07-6096, Biologix Research) bajo condiciones *in vitro*. En cada pocillo se colocaron 150 μL de las soluciones bacterianas (1×10^8 UFC mL^{-1}). Posteriormente, se añadieron 150 μL de las soluciones de esporas fúngicas (1×10^6 esporas mL^{-1}) en medio caldo de papa y dextrosa (BD Difco Laboratories, Sparks Maryland, MD, USA). Las microplacas inoculadas fueron selladas e incubadas a 28 °C durante 48 h en oscuridad. Para evaluar la degradación de esporas fúngicas, se tomaron

10 μL de cada pocillo y se realizó el conteo directo de las esporas presentes mediante el uso de una cámara Neubauer.

El ensayo se estableció bajo un diseño factorial completamente al azar 4x6, evaluando dos factores: cepas bacterianas (Bc28-2, Bc28-5, Bt24 y CP) y hongos (FM1, FM2, FL1, FL5, FL6 y FL2), resultando en 24 tratamientos únicos correspondientes a cada combinación bacteria-hongo y como controles se emplearon solo las soluciones de esporas fúngicas. Todos los tratamientos tuvieron tres repeticiones.

Promoción del crecimiento en plántulas de chile por *Bacillus* spp. Para evaluar el efecto de las bacterias sobre el desarrollo de plántulas de chile jalapeño, se sembraron semillas estériles de chile en bandejas de poliestireno de 20 cavidades llenas de perlita hortícola estéril (1h a 120 °C a 15 lb/in²). Las charolas se regaron con una solución nutritiva (Nutrient Solution for Vegetables®; pH 5.5 y conductividad eléctrica de 1.5 mS). Las plántulas fueron crecidas en condiciones de invernadero a 27 °C \pm 2 °C y una humedad relativa (HR) de 75 %. Las plántulas se inocularon a la base del tallo con 5 mL de las suspensiones bacterianas de Bc28-5, Bc28-2, Bt24 y el PC (1x10⁸ UFC mL⁻¹) a los 10 días de la siembra. La inoculación se realizó cada seis días en cinco ocasiones. Transcurridos 30 días de la primera inoculación, se evaluaron variables morfológicas de altura de plántula, longitud de raíz, diámetro de tallo, número de hojas, área foliar (Canopeo App; <https://canopeoapp.com>) y la biomasa fresca y seca de hojas, tallo y raíz. Asimismo, se evaluó el contenido de pigmentos fotosintéticos (clorofila a, clorofila b y carotenoides) de acuerdo a la metodología de Lichtenthaler y Wellburn (1983).

El ensayo se estableció bajo un DCA con cuatro repeticiones por tratamiento. Los tratamientos fueron las soluciones bacterianas aplicadas a las charolas de plántulas de chile y como control se emplearon plántulas sin inocular.

Biocontrol de *Fusarium* por *Bacillus* sp. en condiciones de invernadero. Para este ensayo se utilizaron plántulas de chile jalapeño de 40 días de edad crecidas bajo las condiciones descritas anteriormente inoculadas con las cepas Bc28-2, Bc28-5, Bt24 y PC. Las plántulas se trasplantaron a macetas de 10 cm de diámetro con peat moss estéril inoculado con esporas de *F. oxysporum* FL2 (cepa con un IS alto, la mayor área bajo la curva de la enfermedad y resistencia a degradación de esporas). Para ello, previo al trasplante el peat moss estéril (1h a 120 °C a 15 lb/in²) se inoculó con una solución de esporas del hongo a 1x10⁶ esporas mL⁻¹ e incubado a 28 °C por cinco días. Las plántulas inoculadas fueron colocadas en condiciones de invernadero a 27 \pm 2 °C y una HR de 75 %. Las plantas fueron regadas cada tercer día con solución nutritiva. Transcurridos 30 días del trasplante, se evaluó el IS de la enfermedad con la escala: 0= sistema radicular sano, 1= daño en el sistema radicular de 1 a 25 %, 2= daño en el sistema radicular de 25 a 50 %, 3= daño en el sistema radicular de 50 a 75 % y 4= daño radicular de 75 a 100 %. El IS fue calculado mediante la fórmula propuesta por Galanihe *et al.* (2004). Además, se evaluaron variables morfológicas de altura de plántula, longitud de raíz, diámetro de tallo, número de hojas, área foliar (Canopeo App), volumen radicular y la biomasa fresca y seca de hojas, tallo y raíz. Asimismo, se determinó el contenido de pigmentos fotosintéticos de acuerdo a la metodología de Lichtenthaler y Wellburn (1983). El ensayo se estableció bajo un DCA con cuatro repeticiones por tratamiento, los cuales se describen en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Tratamientos empleados en el biocontrol de *Fusarium oxysporum* FL2 aplicados en plantas de chile jalapeño crecidas bajo condiciones de invernadero.

	Clave
<i>Fusarium oxysporum</i> FL2	FL2
<i>Bacillus subtilis</i> QST713 + <i>F. oxysporum</i> FL2	CP/FL2
<i>B. cereus</i> Bc28-2 + <i>F. oxysporum</i> FL2	Bc28-2/FL2
<i>B. cereus</i> Bc28-5 + <i>F. oxysporum</i> FL2	Bc28-5/FL2
<i>B. thuringiensis</i> Bt24 + <i>F. oxysporum</i> FL2	Bt24/FL2
Plantas sin tratamiento microbiano	Control

Análisis estadístico. Los datos de los ensayos se sometieron a pruebas de Shapiro-Wilk y Levene para evaluar la normalidad y la homogeneidad de varianza, previo a su análisis estadístico.

Los datos de las pruebas de patogenicidad y virulencia *in vitro* se analizaron con una prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis y con el test de Conover-Iman ($p < 0.05$). Los resultados de la degradación de esporas fúngicas en la prueba de antagonismo *in vitro*, se analizaron mediante un análisis factorial para evaluar los efectos principales (bacterias y hongos) y sus interacciones sobre la degradación de esporas. Posteriormente se realizaron comparaciones múltiples mediante la prueba de Scott-Knott ($p < 0.05$).

Los datos del ensayo de promoción del crecimiento de plántulas de chile jalapeño por *Bacillus* spp. y los datos de promoción del crecimiento en plantas en interacción con *F. oxysporum* en invernadero se analizaron con análisis de varianzas (ANOVA) seguido de pruebas de separación de medias de Tukey ($p < 0.05$).

Los resultados del índice de severidad en la interacción entre las bacterias y *F. oxysporum* FL2 en invernadero se analizaron con la prueba de Kruskal-Wallis y el test Conover-Iman ($p < 0.05$).

Se realizó un análisis multivariado de componentes principales (ACP) para evaluar la influencia de los tratamientos bacterianos en el biocontrol y promoción del crecimiento en las plantas de chile, en interacción con *F. oxysporum* FL2. Antes del ACP, se realizó la prueba de esfericidad de Bartlett ($p < 0.01$) y se calculó el índice de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), considerando aceptable los KMOs superiores a 0.60 (Tabachnick y Fidell, 2007). Todos los análisis estadísticos se realizaron con los softwares InfoStat (InfoStat 2021v Grupo InfoStat, Argentina) y el software JAMOV 2.5.2.0 (The Jamovi Project, 2024).

RESULTADOS

Pruebas de patogenicidad y virulencia de cepas de *Fusarium*. Las pruebas de patogenicidad y virulencia *in vitro* realizadas con los aislados de *Fusarium* durante la germinación de semillas de chile jalapeño demostró que todos los hongos causaron enfermedad a los 10 días después de la inoculación, sin diferencias significativas entre cepas. Los síntomas observados incluyeron manchas necróticas en la radícula y el hipocótilo, necrosis completa de la radícula, crecimiento micelial en la cubierta de la semilla, ya sea solo o con producción de exudado, y semillas no germinadas con necrosis interna. Todos los tratamientos presentaron una incidencia de la enfermedad del 100 % y una severidad promedio de 89.9 %. El progreso de la enfermedad, medido como el

ABCPE, mostró un valor promedio de 26.7, indicando una progresión rápida y severa de la enfermedad (Cuadro 2). En contraste, el grupo control presentó una germinación y desarrollo saludable de las plántulas. Después del ensayo, los hongos fueron aislados de las plantas infectadas, confirmándose que sus características morfológicas eran idénticas al inóculo inicial, cumpliendo con los postulados de Koch.

Cuadro 2. Incidencia, severidad y progresión de la marchitez en semillas de chile 10 días después de su inoculación con *Fusarium oxysporum*.

Aislado	Incidencia (%)	Severidad (%)	ABCDE ^x
<i>F. oxysporum</i> FM1	100	95.8 ^a	30.2 ^a
<i>F. oxysporum</i> FM2	100	89.6 ^a	27.3 ^a
<i>F. oxysporum</i> FL1	100	89.6 ^a	27.4 ^a
<i>F. oxysporum</i> FL5	100	81.3 ^a	21.0 ^a
<i>F. oxysporum</i> FL6	100	87.5 ^a	23.7 ^a
<i>F. oxysporum</i> FL2	100	95.8 ^a	30.5 ^a
Control	0	0 ^b	0

^xABCDE=área bajo la curva del progreso de la enfermedad. Los valores de cada columna seguidos de la misma letra no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Kruskal-Wallis y Conover-Iman test ($p \leq 0.05$).

Antagonismo *in vitro* de *Bacillus* vs *Fusarium*. El análisis de la degradación de esporas de *Fusarium* por *Bacillus* spp. mostró que la cepa comercial PC presentó los mayores porcentajes de degradación de esporas en comparación con las cepas nativas de *Bacillus* evaluadas (Figura 1). En la interacción con PC, no se observaron diferencias estadísticas significativas entre los hongos, obteniéndose un promedio de degradación del 86.7 %. Por otro lado, en la interacción con la cepa Bc28-5, el hongo FM2 mostró una mayor resistencia a la degradación, con un promedio de 41.4 %, mientras que el resto de los hongos fueron degradados en un 84.2 % en promedio. En el caso de la interacción con la cepa Bc28-2, el hongo FL6 mostró la mayor resistencia a la degradación de esporas con un 18 %, seguido de FL2 y FL1 con un 42.9 %. El resto de los hongos fueron degradados en promedio un 84.9 %. Finalmente, la cepa menos efectiva en la degradación de esporas fue Bt24. Esta solo logró degradar dos hongos (FL1 y FM1) en un 92.85 %, seguido de FL6 y FL2 con un 73.15 %. Los hongos más resistentes fueron FL5 y FM2, con porcentajes de degradación de esporas de 32.8 y 52.2 %, respectivamente.

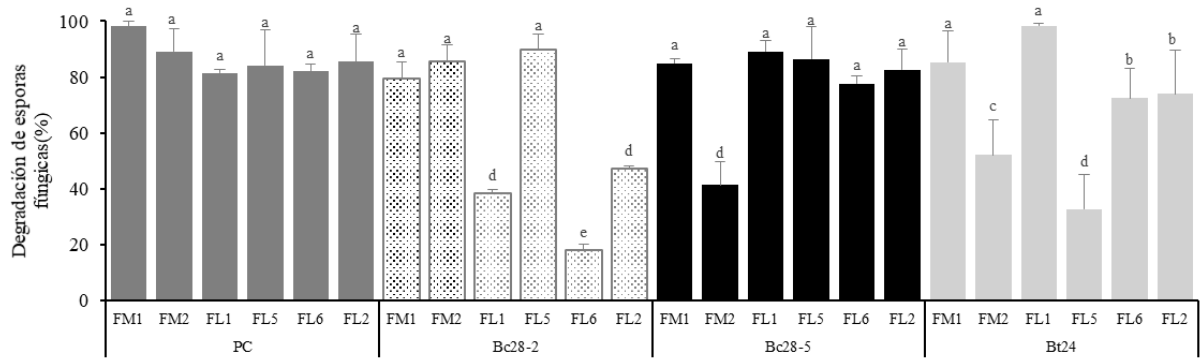


Figura 1. Degradación de esporas de *Fusarium oxysporum* por *Bacillus* spp. en caldo nutritivo después de 48 horas de interacción *in vitro*. PC= *B. subtilis* QST713, Bc28-2 y Bc28-5 =*B. cereus*, Bt24=*B. thuringiensis*. *F. oxysporum*=FM1, FM2, FL1, FL5, FL6, FL2. Las columnas con letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Scott-Knott ($p < 0.05$).

Promoción del crecimiento en plántulas de Chile. La inoculación de bacterias mejoró significativamente el crecimiento de plántulas de Chile en condiciones controladas a los 30 días (Cuadro 3).

Cuadro 3. Efecto de *Bacillus* spp. sobre el crecimiento de plántulas de Chile jalapeño en condiciones controladas después de 30 días de inoculación.

Parámetros	Control	<i>Bacillus subtilis</i> PC	<i>B. cereus</i> Bc28-2	<i>B. cereus</i> Bc28-5	<i>B. thuringiensis</i> Bt24	DMS
AP(cm)	8.2±0.5 ^{bc}	6.6±0.7 ^d	8.9±1.1 ^{ab}	7.7±0.5 ^{cd}	9.8±0.2 ^a	1.1
LR(cm)	8.9±0.8 ^a	8.9±1.5 ^a	9.9±0.8 ^a	9.5±1.4 ^a	9.4±1.4 ^a	2.0
DT (mm)	2.2±0.1 ^c	2.0±0.3 ^c	2.8±0.3 ^{ab}	2.3±0.5 ^{bc}	2.8±0.3 ^a	0.5
NH	8.0±0.6 ^b	10.0±2.8 ^{ab}	12.0±1.3 ^a	9.3±1.5 ^{ab}	12.0±0.9 ^a	2.7
AF (cm ² plant ⁻¹)	51.1±7.1 ^c	48.9±2.1 ^c	115.1±6.7 ^a	76.3±8.5 ^b	103.6±10.7 ^a	20.5
PFH (g)	0.6±0.1 ^c	0.6±0.3 ^c	1.6±0.1 ^a	1.1±0.1 ^b	1.5±0.2 ^a	0.3
PFT (g)	0.3±0.03 ^c	0.3±0.1 ^c	0.7±0.2 ^a	0.5±0.1 ^b	0.7±0.1 ^a	0.2
PFR (g)	0.2±0.1 ^c	0.2±0.09 ^c	0.6±0.1 ^a	0.4±0.1 ^b	0.7±0.1 ^a	0.2
PSH (g)	0.1±0.01 ^c	0.1±0.03 ^c	0.3±0.1 ^a	0.2±0.03 ^b	0.3±0.1 ^a	0.1
PST (g)	0.03±0.01 ^b	0.02±0.01 ^b	0.1±0.01 ^a	0.03±0.01 ^b	0.1±0.01 ^a	0.01
PSR (g)	0.02±0.01 ^{cd}	0.02±0.003 ^d	0.1±0.01 ^b	0.03±0.004 ^c	0.1±0.01 ^a	0.01
Chl a (mg/g PF ⁻¹)	1.5±0.1 ^b	1.7±0.1 ^{ab}	2.1±0.4 ^a	2.2±0.3 ^a	1.9±0.2 ^{ab}	0.6
Chl b (mg/g PF ⁻¹)	0.9±0.3 ^a	0.9±0.1 ^a	1.2±0.4 ^a	1.2±0.2 ^a	1.3±0.1 ^a	0.5
Carotenoides (mg/g PF ⁻¹)	0.2±0.1 ^a	0.2±0.03 ^a	0.2±0.2 ^a	0.2±0.1 ^a	0.1±0.1 ^a	0.2

AP= altura de plántula; LR= longitud de raíz; DT=diámetro de tallo; NH= Número de hojas; AF= área foliar; PFH= peso fresco de hoja; PFT= peso fresco de tallo; PFR= peso fresco de raíz; PSH= peso seco de hoja; PST= peso seco del tallo; PSR= peso seco de la raíz; Chl a= clorofila a; Chl b= clorofila b; DMS= diferencia mínima significativa. PC= *B. subtilis* QST713, Bc28-2 y Bc28-5=*B. cereus*, Bt24=*B. thuringiensis*. Los datos representan las medias ± desviación estándar de cuatro repeticiones. Cada valor en filas seguido de letras diferentes indica diferencia significativa ($p \leq 0.05$) por ANOVA y la prueba de Tukey

Las plántulas inoculadas con Bt24 mostraron el mayor crecimiento en altura, al alcanzar un promedio de 9.8 cm, lo que representa un incremento del 19.5 % respecto al control (8.2 cm). En contraste, el tratamiento con PC resultó con la menor altura (6.6 cm), lo que refleja una reducción del 19.5 % en comparación con el control.

En cuanto a la longitud de raíz, los tratamientos no mostraron diferencias significativas en este parámetro, teniendo un promedio de 9.3 cm. El diámetro de tallo fue significativamente mayor en los tratamientos con Bc28-2 (2.8 mm) y Bt24 (2.8 mm), lo que corresponde a un aumento del 27.3 % respecto al control (2.2 mm).

El número de hojas fue significativamente mayor en plántulas tratadas con Bt24 (12) y Bc28-2 (12), lo que representa un incremento del 50 % respecto al control (8 hojas). Asimismo, el área foliar fue mayor en plántulas inoculadas con Bc28-2 y Bt24 (109.4 cm² planta⁻¹), lo que supone un aumento del 114.0 %, en comparación con el control (51.1 cm² planta⁻¹).

Respecto a la biomasa fresca y seca, el peso fresco de hoja fue significativamente mayor en los tratamientos Bt24 y Bc28-2 (1.6 g), lo que representa un incremento del 166.7 % respecto al control (0.6 g). De igual manera, el peso fresco de tallo fue mayor en Bt24 y Bc28-2 (0.7 g), con un aumento del 133.3 % en comparación con el control (0.3 g). El peso fresco de raíz también fue significativamente mayor con los tratamientos Bt24 y Bc28-2 (0.7 g), incrementándose un 250 % respecto al control (0.2 g).

El peso seco de hoja también mostró un aumento significativo con los tratamientos Bt24 y Bc28-2 (0.3 g), lo que representa un incremento del 200 % respecto al control (0.1 g). El peso seco de tallo mostró un aumento significativo con los tratamientos Bt24 y Bc28-2 (0.1 g), lo que representa un incremento del 233.3 % respecto al control (0.03 g). En el peso seco de raíz el tratamiento Bt24 (0.1 g) mostró el mayor incremento con un 400 % en comparación con el control (0.02 g).

En cuanto al contenido de pigmentos fotosintéticos, la clorofila fue significativamente mayor en los tratamientos Bc28-5 y Bc28-2 (2.2 mg/g PF⁻¹), lo que representa un incremento del 46.7 % respecto al control (1.5 mg/g PF⁻¹). En contraste, el contenido de clorofila b no mostró diferencias significativas entre tratamientos con un promedio de 1.1 mg/g PF⁻¹. De igual manera, el contenido de carotenoides no mostró diferencias significativas entre tratamientos, teniendo un promedio de 0.2 mg/g PF⁻¹.

Crecimiento en plantas de chile en interacción con *Fusarium*. La inoculación de bacterias mejoró significativamente el crecimiento de las plantas de chile en la interacción con el hongo (Cuadro 4).

Las plantas inoculadas con CP/FL2 presentaron la mayor altura, con un promedio de 26.4 cm, lo que representa un incremento del 20 % respecto al control (22.1 cm). En contraste, los tratamientos con FL2 y la interacción Bt24/FL2 registraron las menores alturas (14.4 y 13.0 cm, respectivamente), lo que reflejó una reducción del 34.8 y 41.2 %, respectivamente, en comparación con el control. En cuanto a la longitud de raíz, los tratamientos con interacción bacteria-patógeno mantuvieron una longitud similar al control (18.6 cm), a excepción de la interacción Bt24/FL2 y FL2, que mostraron una reducción del 40.5 % (11.6 cm) respecto al control. El diámetro de tallo fue significativamente mayor en el tratamiento Bc28-5/FL2 (6.1 mm), lo que representa un incremento del 35.6 % respecto al control (4.5 mm). Por otro lado, la interacción Bt24/FL2 presentó el menor diámetro de tallo (3.7 mm), lo que representa una reducción del 17.8 % respecto al control.

Cuadro 4. Efecto de *Bacillus* spp. sobre el crecimiento de plantas de chile en condiciones de invernadero después de 30 días de inoculación de *Fusarium oxysporum* FL2 agente causal de la marchitez del chile.

Tratamientos	Control	FL2	CP/FL2	Bc28-2/FL2	Bc28-5/FL2	Bt24/FL2	DMS
AP(cm)	22.1±1.7 ^b	14.4±1.9 ^{cd}	26.4±1.0 ^a	23.1±1.3 ^{ab}	17.8±1.3 ^c	13.0±2.3 ^d	3.7
LR (cm)	19.4±1.7 ^a	11.5±0.8 ^b	18.4±1.4 ^a	17.9±1.5 ^a	18.1±1.4 ^a	11.6±0.6 ^b	2.9
DT (mm)	4.5±0.5 ^{bc}	5.1±0.7 ^{abc}	5.9±0.6 ^{ab}	4.7±0.5 ^{abc}	6.1±1.0 ^a	3.7±0.7 ^c	1.6
NH	35.5±3.3 ^a	20.3±2.8 ^b	35.0±5.7 ^a	25.0±2.2 ^b	37.3±3.3 ^a	19.0±2.6 ^b	7.9
AF(cm ² planta ⁻¹)	516.3±88.7 ^{ab}	196.1±21.0 ^c	564.0±77.0 ^a	405.4±58.7 ^b	583.8±79.5 ^a	252.2±19.2 ^c	143.2
PFH (g)	10.5±0.9 ^a	3.0±1.0 ^d	9.7±0.9 ^{ab}	6.5±0.8 ^c	7.5±1.7 ^{bc}	3.6±0.4 ^d	2.3
PFT (g)	6.9±1.2 ^{abc}	3.2±1.0 ^{cd}	10.0±2.8 ^a	5.6±1.2 ^{bcd}	9.4±1.5 ^{ab}	3.0±0.9 ^d	3.8
PFR (g)	4.0±0.5 ^{ab}	1.6±0.4 ^c	4.8±0.7 ^a	3.1±0.7 ^b	4.3±0.5 ^{ab}	1.1±0.4 ^c	1.2
PSH (g)	1.9±0.2 ^a	0.6±0.3 ^c	1.6±0.1 ^{ab}	0.8±0.1 ^c	1.4±0.2 ^b	0.5±0.1 ^c	0.4
PST (g)	0.8±0.3 ^{abc}	0.3±0.2 ^c	1.0±0.3 ^{ab}	0.5±0.1 ^{abc}	1.0±0.3 ^a	0.5±0.2 ^{bc}	0.5
PSR (g)	0.5±0.1 ^{ab}	0.2±0.03 ^c	0.5±0.1 ^{ab}	0.4±0.1 ^b	0.5±0.04 ^a	0.1±0.04 ^c	0.1
VR (cm ³)	5.4±0.6 ^a	1.5±0.6 ^c	4.8±0.7 ^{ab}	3.9±0.5 ^b	4.1±0.6 ^{ab}	1.1±0.6 ^c	1.4
Chl a (mg/g PF ⁻¹)	2.0±0.5 ^a	1.8±0.4 ^a	2.0±0.4 ^a	1.8±0.4 ^a	2.0±0.4 ^a	1.8±0.3 ^a	0.9
Chl b (mg/g PF ⁻¹)	0.9±0.3 ^a	1.0±0.3 ^a	1.2±0.3 ^a	1.0±0.1 ^a	1.2±0.3 ^a	1.0±0.4 ^a	0.7
Carotenoides (mg/g PF ⁻¹)	0.3±0.1 ^a	0.1±0.1 ^a	0.2±0.1 ^a	0.2±0.1 ^a	0.1±0.03 ^a	0.3±0.1 ^a	0.2

AP= altura de plántula; LR= longitud de raíz; DT=diámetro de tallo; NH= Número de hojas; AF= área foliar; PFH= peso fresco de hoja; PFT= peso fresco de tallo; PFR= peso fresco de raíz; PSH= peso seco de hoja; PST= peso seco del tallo; PSR= peso seco de la raíz; VR= volumen radicular; Chl a= clorofila a; Chl b= clorofila b; FL2= *F. oxysporum*, PC= *B. subtilis* QST713, Bc28-2 y Bc28-5=*B. cereus*, Bt24=*B. thuringiensis*. DMS= diferencia mínima significativa. Los datos representan las medias ± desviación estándar de cuatro repeticiones. Cada valor en filas seguido de letras diferentes indica diferencia significativa por ANOVA y la prueba de Tukey ($P<0.05$).

El número de hojas no mostró diferencias significativas en los tratamientos CP/FL2 y Bc28-5/FL2 en comparación con el control, teniendo un promedio de 35.9 hojas. Sin embargo, las interacciones Bc28-2/FL2 y Bt24/FL2 y el patógeno FL2 mostraron una reducción significativa, con un promedio de 21.4 hojas, lo que representa una reducción del 39.6 % respecto al control (35.5 hojas). El área foliar fue significativamente mayor en los tratamientos Bc28-5/FL2 y CP/FL2 (573.9 cm³). En contraste, los tratamientos Bt24/FL2 y FL2 presentaron la menor área foliar (224.2 cm³), lo que representa una reducción del 43.4 % en comparación con el control (516.3 cm³).

Respecto a la biomasa fresca, el peso fresco de hoja, solo mostró un valor similar al control, el tratamiento CP/FL2 (9.7 g). El tratamiento Bt24/FL2 y el patógeno FL2 presentaron el menor peso fresco de hoja (3.3 g), lo que representa una disminución del 68.6 % en comparación con el control (10.5 g). En cuanto al peso fresco de tallo y raíz, solo los tratamientos CP/FL2 y Bc28-5/FL2 mantuvieron valores similares al control (9.7 y 4.55 g, respectivamente), mientras que Bt24/FL2 y FL2 registraron el menor peso fresco de tallo (3.1 g) y raíz (1.35 g), lo que representa una reducción del 44.9 y 66.3%, respectivamente.

En la biomasa seca, el peso seco de hoja no mostró incrementos significativos en ninguno de los tratamientos, excepto en CP/FL2, que fue igual al control (1.6 g). El menor peso seco de hoja se observó en Bc28-5/FL2, Bt24/FL2 y FL2 (0.6 g), lo que representa una disminución del 66.7 % respecto al control (1.9 g). En relación al peso seco de tallo, la mayoría de los tratamientos no mostraron diferencias significativas (0.8 g), excepto Bt24/FL2 y FL2, que redujeron el parámetro en un 50 %. En el caso del peso seco de raíz, solo CP/FL2 y Bc28-5/FL2 mantuvieron valores similares al control (0.5 g), mientras que Bt24/FL2 y FL2 presentaron el menor peso seco de raíz (0.15 g), lo que representa una reducción del 70 %.

El volumen radicular no mostró incrementos significativos, manteniéndose igual al control en los tratamientos CP/FL2 y Bc28-5/FL2 (4.5 cm³). Los tratamientos con menor volumen radicular fueron Bt24/FL2 y FL2 (1.3 cm³), con una reducción del 75.9 % respecto al control (5.4 cm³). En cuanto al contenido de pigmentos fotosintéticos, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos en el contenido de clorofila a (2.28 mg/g PF⁻¹), clorofila b (1.26 mg/g PF⁻¹) y carotenoides (0.24 mg/g PF⁻¹).

Los resultados de la severidad indican diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 2a). Las plantas tratadas solo con FL2 presentaron un IS de 87.5 %, significativamente mayor que el resto de los tratamientos. En contraste, los tratamientos con interacción bacteria-patógeno PC/FL2, Bc28-2/FL2 y Bc28-5/FL2 redujeron el IS en 60.4 % en comparación con el patógeno (FL2). En contraste, el tratamiento Bt24/FL2 no mostró una reducción significativa del IS con un 81.3 %, siendo igual al patógeno.

El desarrollo de las plantas en interacción con el patógeno también varió según el tratamiento aplicado (Figura 2b). Las plantas sin tratamiento microbiano se desarrollaron de manera saludable y vigorosa. En contraste, las plantas tratadas con el patógeno presentaron síntomas severos de la enfermedad, particularmente en el sistema radicular, lo que resultó en un desarrollo reducido. Las plantas tratadas con las bacterias-patógeno PC/FL2, Bc28-2FL2 y Bc28-5/FL2 mostraron un desarrollo similar al tratamiento control, caracterizado por un crecimiento aéreo saludable, pero con síntomas reducidos de la enfermedad en el sistema radicular. En contraste, las plantas tratadas con Bt24/FL2 presentaron síntomas severos, comparables a los observados en las plantas tratadas solo con el patógeno.

El análisis de componentes principales permitió visualizar la variabilidad en la respuesta del desarrollo de las plantas de chile jalapeño a los diferentes tratamientos de biocontrol de *Fusarium* (Figura 3). El primer componente principal (Dim 1) explicó el 75.4 % de la variabilidad, mientras que el segundo componente (Dim 2) representó el 11.3 %, acumulando el 86.7 % de la variabilidad total. Se observó que el patógeno y el tratamiento Bt24/FL2 exhiben patrones de comportamiento similares que muestran una relación negativa con la mayoría de los parámetros vegetativos, pero una relación positiva con el IS, lo que indica que Bt24 no contribuyó al control de la enfermedad. En contraste, se identifica una sólida interrelación positiva entre los tratamientos bacterianos PC/FL2, Bc28-2/FL2 y Bc28-5/FL2, y el control en parámetros vegetativos, junto con una relación negativa con el IS, evidenciando un control efectivo de la enfermedad y una promoción del crecimiento por parte de las bacterias.

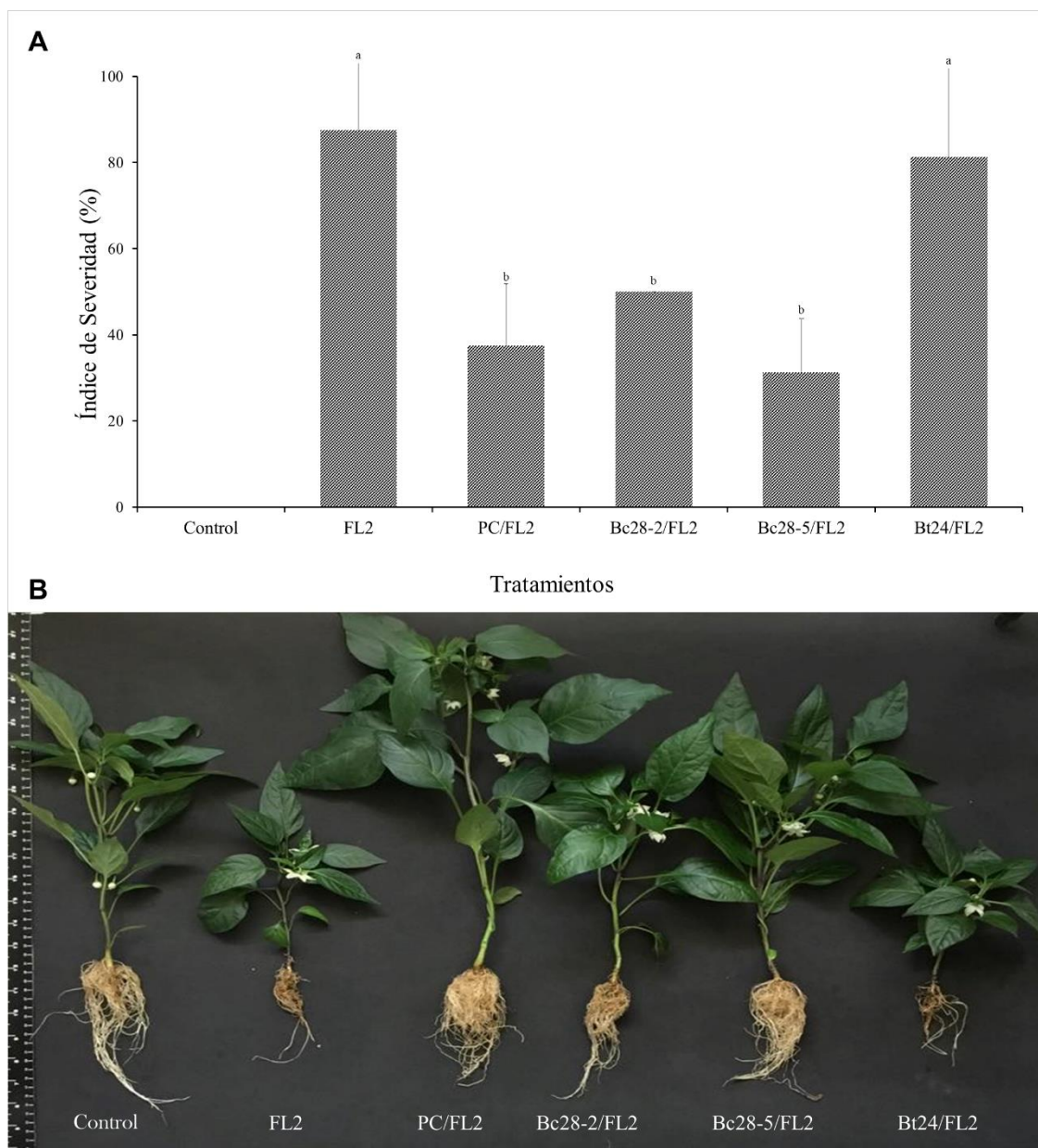


Figura 2. Efecto de *Bacillus* spp. sobre el control de la marchitez del chile causado por *Fusarium oxysporum* FL2 bajo condiciones de invernadero, después de 30 días de inoculación. A) Índice de severidad de la marchitez del chile en interacción con *Bacillus* sp. F= *Fusarium* sp. FL2, PC= producto comercial (*B. subtilis* QST713®), Bc28-2 y Bc28-5=*B. cereus*, Bt24=*B. thuringiensis*. Las barras sobre las columnas indican la desviación estándar. Las columnas con letras diferentes indican diferencias significativas según las pruebas de Kruskal-Wallis y Conover-Iman ($p < 0.05$). B) Sintomatología de la marchitez del chile causado por *F. oxysporum* FL2 y su interacción con *Bacillus* spp. bajo condiciones de invernadero.

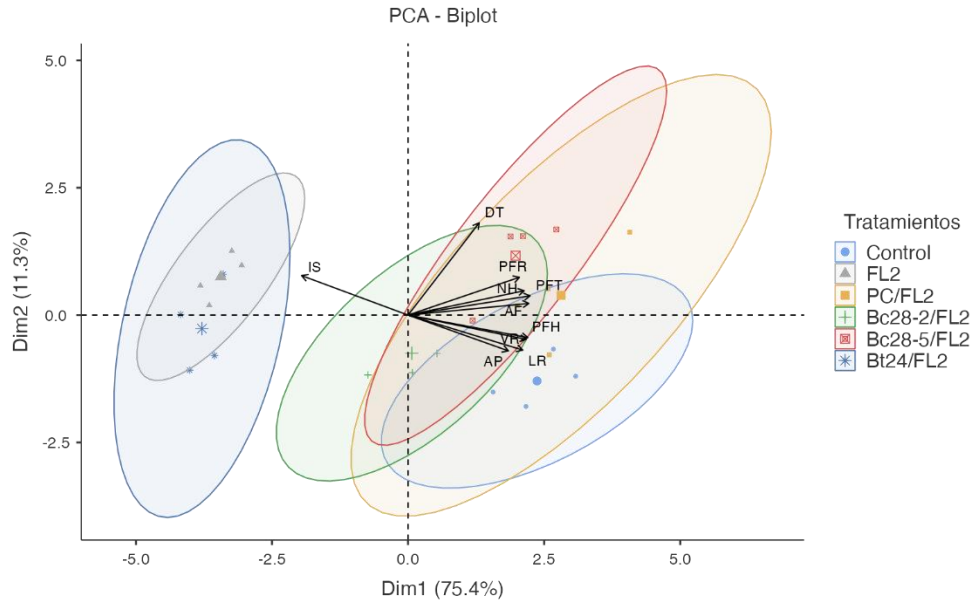


Figura 3. Análisis de Componentes Principales (ACP) del crecimiento de plantas de chile inoculadas con *Fusarium* sp. FL2 (F), producto comercial (PC; *B. subtilis* QST713), *B. cereus* (Bc28-2, Bc28-5), ó *B. thuringiensis* (Bt24) ($\chi^2 = 291$, $df = 45$, $p < .001$). IS=índice de severidad de la enfermedad, AP= altura de plántula, LR= longitud de raíz, DT=díámetro de tallo, NH= Número de hojas, AF= área foliar, PFFH= peso fresco de hoja, PFT= peso fresco de tallo, PFR= peso fresco de raíz, VR=volumen radicular.

DISCUSIÓN

Los resultados de esta investigación muestran que la inoculación de cepas nativas de *Bacillus cereus* (Bc28-5 y Bc28-2) y *B. thuringiensis* (Bt24) en plantas de chile jalapeño bajo condiciones controladas tiene un impacto significativo en el crecimiento vegetativo y en la reducción de la severidad de la marchitez causada por *Fusarium oxysporum*. Además, se evidenció la capacidad de algunas cepas de *Bacillus* para degradar esporas de *Fusarium* de manera efectiva en pruebas *in vitro*. Sin embargo, se observó que la eficacia varió según la cepa bacteriana y la cepa de hongo.

Las pruebas de patogenicidad y virulencia confirmaron que todas las cepas de *Fusarium* fueron patógenas, causando una incidencia de la enfermedad del 100 % y una severidad promedio del 89.9 %. Esto confirma la virulencia de las cepas evaluadas sobre las plántulas de chile jalapeño en condiciones *in vitro*. Los síntomas observados incluyeron necrosis en la radícula y el hipocotilo, lo que concuerda con estudios previos sobre la capacidad de *Fusarium oxysporum* de afectar el sistema radicular de cultivos como el chile jalapeño (Robles-Hernández *et al.*, 2015).

La capacidad antagonista de las cepas de *Bacillus* en la degradación de esporas de *Fusarium* varió significativamente. La cepa comercial PC mostró el porcentaje de degradación de esporas (86.7 %) en comparación con las cepas nativas. El antagonismo también fue evidente con Bc28-5, mientras que Bt24 mostró una menor efectividad, especialmente frente a las cepas de *Fusarium* más resistentes (FL5 y FM2). El mecanismo de degradación puede estar asociado con la producción de lipopéptidos antifúngicos, ya que estudios previos han demostrado que *B. cereus* y *B. thuringiensis* son capaces de controlar a *F. oxysporum* f sp. *lycopersici* mediante la producción de péptidos

antimicrobianos (Sarangi *et al.*, 2017). Ajesh *et al.* (2013) reportan que *B. cereus* aislado de suelo produce kurina lipopéptido con actividad antifúngica. Además, puede producir enzimas líticas como quitinasas, glucanasas y proteasas, que hidrolizan las paredes celulares de los hongos (Chenniappan *et al.*, 2019; Ku *et al.*, 2018). En el caso de *B. thuringiensis* recientemente se ha reportado que controla hongos fitopatógenos mediante la producción de bacteriocinas, lactonasas, quitinasas, antibióticos y cianuro de hidrógeno (Gupta *et al.*, 2024; Azizoglu *et al.*, 2023; Yoshida *et al.*, 2019).

En términos de promoción del crecimiento, Bt24 mostró el mayor aumento en altura y biomasa de plántulas. Las cepas Bc28-2 y Bc28-5 también promovieron el crecimiento de manera significativa, aumentando el área foliar, peso fresco y seco de plantas. Esto podría estar asociado con los mecanismos de promoción del crecimiento vegetal mostrados por *B. cereus* en estudios realizados por Kumar *et al.* (2020), Ku *et al.* (2018) y Yanti y Nasution (2017). Kumar *et al.* (2020) reportan que *B. cereus* puede producir ácido idolacético (AIA) y giberelinas, como mecanismos de promoción de crecimiento vegetal; asimismo Ku *et al.*, (2018) indican que esta bacteria solubiliza fósforo orgánico e inorgánico, lo cual favorece el desarrollo de las plantas. Yanti y Nasution (2017) indican que este grupo de bacterias colonizan rápidamente la rizósfera de las plantas debido a la producción de exopolisacáridos y *B. cereus* produce biopelículas que facilitan la colonización de las raíces de las plantas (Gao *et al.*, 2019; Wijman *et al.*, 2007). Por otra parte, el efecto de *B. thuringiensis* puede estar asociado a su capacidad de producir AIA y 1 aminociclopropano-1-carboxilato desaminasa como reguladores de crecimiento vegetal (Cherif-Silini *et al.*, 2016). También se ha reportado que produce sideróforos que mejoran la absorción de nutrientes por parte de la planta (Delfim, 2021), y solubiliza fósforo del suelo mediante la producción de ácidos orgánicos, cambios en el pH del medio y la producción de fosfatasas ácidas y alcalinas (Cherif-Silini *et al.*, 2016; Delfim, 2020).

Por otra parte, el biocontrol de *Fusarium* en plantas de chile jalapeño en condiciones de invernadero, mostró que los tratamientos con *B. cereus* (Bc28-2 y Bc28-5), redujeron significativamente la severidad de la enfermedad causada por *Fusarium* FL2, en comparación con el tratamiento solo con el patógeno. Estos resultados podrían deberse a que *B. cereus* ha demostrado reducir la severidad de enfermedades fúngicas mediante compuestos antimicrobianos como los mencionados anteriormente y la inducción de resistencia sistémica (ISR) en plantas (Boulahouat, 2023). Algunos estudios han encontrado que *B. cereus* induce ISR contra hongos como *Botrytis cinerea* en tomate mediante la producción de ácido oxálico (Yu *et al.*, 2022; Nie *et al.*, 2017;). Asimismo, *B. cereus* MH778713 puede ayudar contra *F. oxysporum* en tomate, mediante la ISR (Nie *et al.*, 2017). *B. cereus* EC9 fue reportado como inductor de resistencia en plantas de kalanchoe (*Kalanchoe blossfeldiana*) contra *F. oxysporum* (Madriz-Ordeñana *et al.*, 2022). Además, se ha reportado que *B. cereus* C1L puede inducir ISR mediante la producción de compuestos volátiles como el dimetil disulfuro (Piechulla *et al.*, 2017).

El crecimiento observado durante la interacción entre *Fusarium* spp. FL2 y *B. cereus* puede deberse a lo reportado por Leibman-Markus *et al.* (2023), quienes sugieren que la promoción del crecimiento y la resistencia inducida pueden ser codependientes. En ciertos casos, la inoculación con bacterias como *Bacillus* puede impulsar los procesos de desarrollo y promover el rendimiento de las plantas en interacción de biocontrol (Gupta *et al.*, 2022). Sin embargo, el tratamiento con Bt24/FL2 presentó un comportamiento inesperado al mostrar resultados similares al patógeno solo, tanto en severidad como en parámetros de crecimiento. Esto podría deberse a la limitada capacidad antagonista de

Bt24 frente a determinadas cepas de *Fusarium*, lo cual resalta la necesidad de evaluar la especificidad de interacción bacteria-patógeno.

Los resultados sugieren que el uso de las cepas específicas de *Bacillus* puede contribuir al manejo integrado de *Fusarium* en sistemas agrícolas, mejorando el crecimiento de las plantas mientras reduce la severidad de la enfermedad. Esto abre la posibilidad de desarrollar formulados específicos, especialmente con cepas como Bc28-2 y Bc28-5, para su aplicación en condiciones de invernadero y campo.

CONCLUSIONES

El presente estudio demostró que todas las cepas de *Fusarium oxysporum* aisladas de suelo son patógenas de plántulas de chile jalapeño, lo que representa una incidencia del 100 % y una severidad promedio del 89.9 %. El progreso de la enfermedad indicó una rápida progresión en condiciones controladas.

El biocontrol *in vitro* mostró que *B. subtilis* (PC) presentó la mayor degradación de esporas de *F. oxysporum* (86.7 %), seguido de *B. cereus* (84.2 %), mientras que *B. thuringiensis* fue menos efectiva. Esto sugiere que el efecto antagonista depende de la cepa antagonista y patógeno evaluado.

El biocontrol en invernadero con *Bacillus* spp. mostró variabilidad en la efectividad según la cepa utilizada, *B. cereus* Bc28-2 y Bc28-5 redujeron la severidad de la enfermedad en un 60.4 % y promovieron el crecimiento de plantas de chile. En contraste, Bt24 no logró reducir la enfermedad, con resultados similares al tratamiento con el patógeno. Sin embargo, Bt24 y Bc28-2 promovieron el crecimiento vegetal de las plántulas de chile.

Estos resultados indican el potencial de *Bacillus cereus* como bioinoculante en chile jalapeño, aunque es necesario validar su efectividad en campo y explorar su integración en estrategias de manejo agrícola sostenible.

Limitaciones

Aunque los ensayos de esta investigación se realizaron bajo condiciones controladas, los resultados deben ser validados en condiciones de campo. Además, la variación en la respuesta de las diferentes cepas sugiere que la eficiencia del biocontrol puede estar influenciada por factores específicos del hongo. Por lo que se recomienda investigar los mecanismos moleculares involucrados en la degradación de esporas por parte de *Bacillus* spp., así como su eficacia bajo condiciones ambientales variables. Además, la evaluación a largo plazo en condiciones de campo es fundamental para determinar la viabilidad de estos tratamientos en la práctica agrícola.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Financiamiento

Esta investigación no recibió financiación externa

Contribución de autores

Concepción, J.H.H, A.G.C. y L.R.H; metodología, A.A.A.B., M.M.A y J.H.H.; software, J.H.H., L.R.H. y A.A.A.B ; validación, M.M.A, J.H.H. y A.G.C.; análisis formal, M.M.A.

y L.R.H.; investigación, M.M.A., A.G.C. y J.H.H. ; recursos, J.H.H, A.A.A.B.; curación de datos, J.H.H., L.R.H. y A.A.A.B; redacción: preparación del borrador original, M.M.A., J.H.H. y A.G.C.; redacción: revisión y edición, J.H.H., L.R.H. y A.A.A.B.; visualización, M.M.A.; supervisión, J.H.H. y A.G.C.; administración de proyectos, J.H.H.; adquisición de fondos, J.H.H, L.R.H. Todos los autores han leído y están de acuerdo con la versión publicada del manuscrito.

REFERENCIAS

- Adina GD, Yalew M and Berhan. 2021. Survey on major diseases of vegetable and tuber crops in South Gondar zone, Ethiopia. In: Birhanu et al. (Eds.), *Results of Plant Protection Research*. Proceedings of the Completed Plant Protection Research Activities pp. 106–111 <https://doi.org/10.31254/njes.2021.8201>
- Ajesh K, Sudarshil S, Arunan C and Sreejith K. 2013. Kannurin, a novel lipopeptide from *Bacillus cereus* strain AK1: isolation, structural evaluation and antifungal activities. *Journal of Applied Microbiology* 115(6): 1287–1296. <https://doi.org/10.1111/jam.12324>
- Antil S, Kumar R, Pathak DV, Kumar A, Panwar A and Kumari A. 2022. Plant growth-promoting rhizobacteria-*Bacillus cereus* KMT-5 and *B. megaterium* KMT-8 effectively suppressed *Meloidogyne javanica* infection. *Applied Soil Ecology* 174: 104419. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104419>
- Azizoglu U, Salehi JG, Sansinenea E and Sanchis-Borja V. 2023. Biotechnological advances in *Bacillus thuringiensis* and its toxins: Recent updates. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* 22(2): 319–348. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09652-5>
- Bashir MR, Atiq M, Sajid M, Mohsan M, Abbas W, Alam MW and Bashair M. 2018. Antifungal exploitation of fungicides against *Fusarium oxysporum* f. sp. *capsici* causing *Fusarium* wilt of chilli pepper in Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research* 25: 6797–6801. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1032-9>
- Bobadilla-Larios V, Esparza-Ibarra E, Delgadillo-Ruiz L, Gallegos-Flores P y Ayala-Lujan JL. 2017. Variedades de Chile (*Capsicum annum* L.) identificadas mediante marcadores RAPD. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 20(3): 465–473. Available online: <https://www.redalyc.org/pdf/939/93953814014.pdf> (accessed on 1 April 2025)
- Boulahouat S, Cherif-Silini H, Silini A, Bouket AC, Luptakova L, Alenezi FN and Belbahri L. 2023. Biocontrol efficiency of rhizospheric *Bacillus* against the plant pathogen *Fusarium oxysporum*: a promising approach for sustainable agriculture. *Microbiology Research* 14(3): 892–908. <https://doi.org/10.3390/microbiolres14030062>
- Campbell CL and Madden LV. 1990. *Introduction to Plant Disease Epidemiology*. 1st ed.; John Wiley and Sons: New York, USA, pp. 1–532.
- Chandrasekaran M, Belachew ST, Yoon E and Chun SC. 2017. Expression of β -1,3-glucanase (GLU) and phenylalanine ammonia-lyase (PAL) genes and their enzymes in tomato plants induced after treatment with *Bacillus subtilis* CBR05 against *Xanthomonas campestris* pv. *vesicatoria*. *Journal of General Plant Pathology* 83: 7–13. <https://doi.org/10.1007/s10327-016-0692-5>
- Chenniappan C, Narayanasamy M, Daniel GM, Ramaraj GB, Ponnusamy P, Sekar J and Ramalingam PV. 2019. Biocontrol efficiency of native plant growth promoting rhizobacteria against rhizome rot disease of turmeric. *Biological Control* 129: 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2018.07.002>
- Cherif-Silini H, Silini A, Yahiaoui B, Ouzari I and Boudabous A. 2016. Phylogenetic and plant-growth-promoting characteristics of *Bacillus* isolated from the wheat rhizosphere. *Annals of Microbiology* 66: 1087–1097. <https://doi.org/10.1007/s13213-016-1194-6>
- Chowdhury SP, Hartmann A, Gao X and Borriss R. 2015. Biocontrol mechanism by root-associated *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42—a review. *Frontiers in microbiology* 6: 780. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00780>
- Delfim J, Gerding M and Zagal E. 2020. Phosphorus fractions in Andisol and Ultisol inoculated with *Bacillus thuringiensis* and phosphorus uptake by wheat. *Journal of Plant Nutrition* 43(18): 2728–2739. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1793176>
- Delfim J and Dijoo ZK. 2021. *Bacillus thuringiensis* as a biofertilizer and plant growth promoter. In *Microbiota and Biofertilizers, Vol 2: Ecofriendly Tools for Reclamation of Degraded Soil Environs*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland pp. 251–265. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61010-4_12

- Fatima R, Mahmood T, Moosa A, Aslam MN, Shakeel MT, Maqsood A and Al-Shehri M. 2023. *Bacillus thuringiensis* CHGP12 uses a multifaceted approach for the suppression of *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* and to enhance the biomass of chickpea plants. *Pest Management Science* 79(1): 336–348. <https://doi.org/10.1002/ps.7203>
- Gabreikiristos E and Demiyo T. 2020 *Hot pepper fusarium wilt (Fusarium oxysporum* f. sp. *capsici*): Epidemics, characteristic features and management options. *Journal of Agricultural Science* 12(10): 347–360. <https://doi.org/10.5539/jas.v12n10p347>
- Galanihe LD, Priyantha MGD, Yapa DR, Bandara HMS and Ranasinghe JADAR. 2004. Insect pest and disease incidences of exotic hybrids chilli pepper varieties grown in the low country dry zone of Sri Lanka. *Annals of Sri Lanka*, 6, 99–106. Available online: [https://www.sphinxsai.com/2022/ch_vol15_no2/1/\(67-75\)V15N2CT.pdf](https://www.sphinxsai.com/2022/ch_vol15_no2/1/(67-75)V15N2CT.pdf) (accessed on 6 April 2025)
- Gao T, Ding M, Yang CH, Fan H, Chai Y and Li Y. 2019. The phosphotransferase system gene ptsH plays an important role in MnSOD production, biofilm formation, swarming motility, and root colonization in *Bacillus cereus* 905. *Research in Microbiology* 170(2): 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2018.10.002>
- Gupta R, Elkabetz D, Leibman-Markus M, Jami E and Bar M. 2022. Cytokinin-microbiome interactions regulate developmental functions. *Environmental Microbiome* 17(1): 2. <https://doi.org/10.1186/s40793-022-00397-2>
- Gupta R, Keppanan R, Leibman-Markus M, Matveev S, Rav-David D, Shulhani R, Elad Y, Ment D and Bar M. 2024. *Bacillus thuringiensis* promotes systemic immunity in tomato, controlling pests and pathogens and promoting yield. *Food Security* <https://doi.org/10.1007/s12571-024-01441-4>
- Hernández-Huerta J, Tamez-Guerra P, Gomez-Flores R, Delgado-Gardea MCE, Robles-Hernández L, Gonzalez-Franco AC and Infante-Ramirez R. 2023. Pepper growth promotion and biocontrol against *Xanthomonas euvesicatoria* by *Bacillus cereus* and *Bacillus thuringiensis* formulations. *PeerJ* 11: e14633. <https://doi.org/10.7717/peerj.14633>
- Hyder S, Gondal AS, Rizvi ZF, Ahmad R, Alam MM, Hannan A, Ahmed W, Fatima N and Inam-Ul-Haq M. 2020 Characterization of native plant growth promoting rhizobacteria and their anti-oomycete potential against *Phytophthora capsici* affecting chilli pepper (*Capsicum annum* L.). *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69410-3>
- Jo H, Tagele SB, Pham HQ, Kim M, Choi S, Kim M, Park Y, Ibal J., Park G and Shin J. 2020. Response of soil bacterial community and pepper plant growth to application of *Bacillus thuringiensis* KNU-07. *Agronomy* 10(4): 551. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040551>
- Ku Y, Xu G, Tian X, Xie H, Yang X and Cao C. 2018. Root colonization and growth promotion of soybean, wheat and Chinese cabbage by *Bacillus cereus* YL6. *PLoS One* 13(11): e0200181. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200181>
- Kulkova I, Dobrzyński J, Kowalczyk P, Bełżecki G and Kramkowski K. 2023. Plant growth promotion using *Bacillus cereus*. *International Journal of Molecular Sciences* 24(11): 9759. <https://doi.org/10.3390/ijms24119759>
- Kumar P, Pahal V, Gupta A, Vadhan R, Chandra H and Dubey RC. 2020. Effect of silver nanoparticles and *Bacillus cereus* LPR2 on the growth of *Zea mays*. *Scientific Reports* 10(1): 20409. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77460-w>
- Leibman-Markus M, Schneider A, Gupta R, Marash I, Rav-David D, Carmeli-Weissberg M, Elad Y and Bar M. 2023. Immunity priming uncouples the growth–defense trade-off in tomato. *Development* 150(21). <https://doi.org/10.1242/dev.201158>
- Lichtenthaler H and Wellburn AR. 1983. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Portland Press Limited, London*. <https://doi.org/10.1042/bst0110591>.
- Lozada DN, Bosland PW, Barchenger DW, Haghshenas-Jaryani M, Sanogo S and Walker S. 2022. Chile pepper (*Capsicum*) breeding and improvement in the “multi-omics” era. *Frontiers in Plant Science* 13: 879182. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.879182>
- Madriz-Ordeñana K, Pazarlar S, Jørgensen HJL, Nielsen TK, Zhang Y, Nielsen KL, Hansen LH and Thordal-Christensen H. 2022. The *Bacillus cereus* strain EC9 primes the plant immune system for superior biocontrol of *Fusarium oxysporum*. *Plants* 11(5): 687. <https://doi.org/10.3390/plants11050687>
- Malik MS, Haider S, Rehman A, Rehman SU, Jamil M, Naz I and Anees M. 2022. Biological control of fungal pathogens of tomato (*Lycopersicon esculentum*) by chitinolytic bacterial strains. *Journal of Basic Microbiology* 62(1): 48–62. <https://doi.org/10.1002/jobm.202100512>
- Nie P, Li X, Wang S, Guo J, Zhao H and Niu D. 2017. Induced systemic resistance against *Botrytis cinerea* by *Bacillus cereus* AR156 through a JA/ET- and NPR1-dependent signaling pathway and activates PAMP-triggered immunity in *Arabidopsis*. *Frontiers in Plant Science* 8: 238. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00238>
- Pazarlar S, Madriz-Ordeñana K and Thordal-Christensen H. 2022. *Bacillus cereus* EC9 protects tomato against *Fusarium* wilt through JA/ET-activated immunity. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1090947. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1090947>

- Piechulla B, Lemfack MC and Kai M. 2017. Effects of discrete bioactive microbial volatiles on plants and fungi. *Plant, Cell & Environment* 40(10): 2042–2067. <https://doi.org/10.1111/pce.13011>
- Praca LB, Gomes ACMM, Cabral GB, Martins ES, Sujii ER and Pontes RGMS. 2012. Endophytic colonization by Brazilian strains of *Bacillus thuringiensis* on cabbage seedlings grown *in vitro*. *Bt Research* 3(3): 11–19. <http://doi.org/10.5376/bt.2012.03.0003>
- Robles-Hernández L, Hernández-Huerta J, González-Franco AC, Hernández-Rodríguez OA, Núñez-Barrios A and Pérez-Leal R. 2015. *Streptomyces* PRIO41 as plant growth promoter of jalapeño pepper plants and as biocontrol agent of *Fusarium*. *Phyton*, 84(2), 253. Available online: <https://www.proquest.com/docview/2398004132?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true&sourcetype=Scholarly%20Journals> (accessed on 5 April 2025)
- Sam-on MFS, Mustafa S, Yusof MT, Hashim AM and Aizuddin KNAK. 2024. Exploring the global trends of microbial agents for pest and pathogen control in chili cultivation. *Saudi Journal of Biological Sciences* 104046. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2024.104046>
- Sarangi T, Ramakrishnan S and Nakkeeran S. 2017. Antimicrobial peptide genes present in indigenous isolates of *Bacillus* spp. exhibiting antimicrobial properties. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 6(8): 1361–1369. <https://doi.org/10.20546/ijemas.2017.608.166>
- Sela-Buurlage MB, Budai-Hadrian O, Pan Q, Carme-Goren L, Vunsch R, Zamir D and Fluhr R. 2001. Genome-wide dissection of *Fusarium* resistance in tomato reveals multiple complex loci. *Molecular Genetics and Genomics* 265: 1104–1111. <https://doi.org/10.1007/s004380100509>
- Shafi J, Tian H and Ji M. 2017. *Bacillus* species as versatile weapons for plant pathogens: A review. *Biotechnology & Biotechnological Equipment* 31(3): 446–459. <https://doi.org/10.1080/13102818.2017.1286950>
- Shaheen N, Khan UM, Azhar MT, Tan DKY, Atif RM, Israr M, Yang SH, Chung G and Rana IA. 2021. Genetics and genomics of *Fusarium* wilt of chilies: A review. *Agronomy* 11: 2162. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112162>
- Saner G and Finney RE. 1977. The effect of nitrogen fertilization on the expression of slow-mildewing resistance in Knox wheat. *Phytopathology* 67(8): 1051–1056. Available online: <https://acortar.link/M8Yvo6> (accessed on 2 April 2025)
- SIAP. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Panorama Agroalimentario. Available online: https://nube.siap.gob.mx/panorama_siap/pag/2020/Atlas-Agroalimentario-2020 (accessed on 1 April 2025).
- Tabachnick BG and Fidell LS. *Using Multivariate Statistics*, 5th ed.; Pearson Education, Inc.: Boston, MA, USA, 2007; Available online: <https://acortar.link/Ynt78M> (accessed on 12 January 2025).
- Thakur N, Nath AK, Chauhan A and Gupta R. 2022 Purification, characterization, and antifungal activity of *Bacillus cereus* strain NK91 chitinase from rhizospheric soil samples of Himachal Pradesh, India. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 69(5): 1830–1842. <https://doi.org/10.1002/bab.2250>
- Tiwari S, Prasad V. 2019. and Lata, C. *Bacillus*: Plant growth promoting bacteria for sustainable agriculture and environment. In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, pp. 43–55. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64191-5.00003-1ç>
- Wijman JG, Leeuw PP, Moezelaar R, Zwietering MH and Abee. 2027 T. Air-liquid interface biofilms of *Bacillus cereus*: formation, sporulation, and dispersion. *Applied and Environmental Microbiology* 73(5): 1481–1488. <https://doi.org/10.1128/AEM.01781-06>
- Yanti Y, Habazar T, Refinaldon R, Nasution, C.R and Felia S. 2017. Indigenous *Bacillus* spp. ability to growth promoting activities and control bacterial wilt disease (*Ralstonia solanacearum*). *Biodiversitas* 18(4): 1562–1567. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d180434>
- Yanti Y, Hamid H, Syarif Z and Afeland SN. 2021. Selected formulations of *Bacillus cereus* strain SLBE3.1AP with different storage durations for control *Fusarium oxysporum* f. sp. *capsici* Chili Plants. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology* 6: 6. <https://dx.doi.org/10.22161/ijeab>
- Yoshida S, Koitabashi M, Yaginuma D and Anzai M. 2019. and Fukuda, M. Potential of bioinsecticidal *Bacillus thuringiensis* inoculum to suppress gray mold in tomato based on induced systemic resistance. *Journal of Phytopathology* 167(11–12): 679–685. <https://doi.org/10.1111/jph.12864>
- Yu Y, Si F, Wang N, Wang T, Jin Y, Zheng Y, Yang W, Luo Y, Niu D, Guo J. and Jiang C. 2022. *Bacillus*-Secreted oxalic acid induces tomato resistance against gray mold disease caused by *Botrytis cinerea* by activating the JA/ET Pathway. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 35(8): 659–671. <https://doi.org/10.1094/mpmi-11-21-0289-r>
- Zhou H, Ren Z, Zu X, Yu X, Zhu H, Li X, Zhong J and Liu E. 2021. Efficacy of plant growth-promoting bacteria *Bacillus cereus* YN917 for biocontrol of rice blast. *Frontiers in Microbiology* 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.684888>

Zibanezhadian M, Pakdaman Sardrood B, Taheri H and Farkhari M. 2020. Anti-oxidative Response of *Bacillus thuringiensis*-Primed Tomato Plants to *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. Journal of Plant Molecular Breeding 8(2): 29–37. <https://doi.org/10.22058/jpmb.2022.543818.1245>