

## Influencia de rizobacterias en la producción y calidad nutraceutica de tomate bajo condiciones de invernadero

Gabriela González Rodríguez<sup>1</sup>  
Bernardo Espinosa Palomeque<sup>1</sup>  
Pedro Cano Ríos<sup>2</sup>  
Alejandro Moreno Reséndez<sup>3</sup>  
Lucio Leos Escobedo<sup>2</sup>  
Homero Sánchez Galván<sup>4</sup>  
Jorge Sáenz Mata<sup>4§</sup>

<sup>1</sup>Posgrado en Ciencias Agrarias, <sup>2</sup>Departamento de Horticultura, <sup>3</sup>Departamento de Suelos-Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro-Unidad Laguna. Periférico Raúl López Sánchez km 1.5 y Carretera Santa Fe s/n, Torreón, Coahuila, México CP. 27010. (Gaby\_agronomo96@hotmail.com; berna.palomeque@outlook.com; canorp49@hotmail.com; alejamorsa@yahoo.com; lleose@yahoo.com). <sup>4</sup>Laboratorio de Ecología Microbiana, Facultad de Ciencias Biológicas-Universidad Juárez del Estado de Durango. Av. Universidad s/n, Fracc. Filadelfia, Gómez Palacio, Durango, México. CP. 35010. (ing.sanchez.gh@hotmail.com).

§Autor para correspondencia: jsaenz-mata@ujed.mx.

### Resumen

Una alternativa en la agricultura orgánica es la utilización de biofertilizantes base rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal y abonos orgánicos “plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) por sus siglas en inglés”. El objetivo fue evaluar el efecto de la inoculación de PGPR (*Bacillus* sp., *Aeromonas* sp. y *Pseudomonas lini*), utilizando dos sustratos: S1= compost+arena de río+perlita, y S2= arena de río y como testigos ambos sustratos sin PGPR (ocho tratamientos), sobre el rendimiento y calidad de frutos de tomate producidos en invernadero. El diseño experimental utilizado fue completamente al azar con tres repeticiones en un arreglo factorial (2×4), donde los factores A y B fueron: a) sustratos y b) PGPR. Los resultados indican que el sustrato S1 incremento los contenidos de SST, licopeno, azúcares totales, ácido ascórbico y el porcentaje de ácido cítrico en frutos de tomate. La inoculación de la cepa *Bacillus* sp., produjo los mayores contenidos de SST, licopeno y ácido ascórbico en frutos de tomate. En base al conjunto de respuestas en los frutos de tomate desarrollados con diferentes sustratos y PGPR, el mejor tratamiento fue el T<sub>1</sub> (*Bacillus* sp. + S1) el cual incremento un 17.54, 8.77, 17.34, 31.31 y 11.52%, el rendimiento, los contenidos de SST, licopeno, azúcares reductores y ácido ascórbico, respectivamente, en relación con el resto de los tratamientos. Por lo tanto, la cepa *Bacillus* sp. y el sustrato base compost podrían ser una alternativa, debido que mejoran la calidad nutraceutica de frutos, sin disminuir el rendimiento de tomate en invernadero.

**Palabras claves:** *Solanum lycopersicum* L., biofertilizantes, compost, licopeno, PGPR.

Recibido: enero de 2018  
Aceptado: marzo de 2018

## Introducción

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los principales cultivos a nivel mundial, debido a que el fruto de esta hortaliza es un componente importante en la alimentación diaria de la población de muchos países ya que es fuente de antioxidantes, tales como vitaminas A, C y E, carotenoides, flavonoides, licopeno y compuestos fenólicos (Dorais *et al.*, 2001; George *et al.*, 2004). Estas moléculas son capaces de contrarrestar los radicales libres e inhibir la oxidación del DNA, evitando así algunos tipos de cáncer, previenen bloqueos en las arterias, así como la degradación del sistema nervioso y el envejecimiento (Waliszewski y Blasco, 2010). En la actualidad la tendencia de los consumidores es preferir alimentos libres del uso de plaguicidas y fertilizantes inorgánicos, inocuos y con alto valor nutricional (Márquez-Hernández *et al.*, 2013).

Derivado de lo anterior, existen evidencias de que el uso de biofertilizantes base rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal, plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) por sus siglas en inglés (Kloepper y Schroth, 1978; Ashrafuzzaman *et al.*, 2009) y sustratos orgánicos base compost, pueden sustituir parcial o totalmente el suministro de plaguicidas y fertilizantes inorgánicos tanto en sistemas de producción en campo abierto y condiciones protegidas (López *et al.*, 2001; Márquez-Hernández *et al.*, 2013). Además, estas alternativas fortalecen el enfoque de la agricultura orgánica (Pretty, 2008).

Las PGPR son capaces de colonizar el sistema radicular de las plantas y desempeñan diversos mecanismos involucrados en la promoción del crecimiento y rendimiento de las especies vegetales; estos mecanismos se clasifican en directos e indirectos. Los mecanismos directos son aquellos donde estos microorganismos, estimulan el desarrollo de las plantas, a través de la producción de reguladores de crecimiento (auxinas, citoquininas, giberelinas, ácido abscísico), la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización y mineralización de fosfatos (Ahemad y Kibret, 2013; Pii *et al.*, 2015).

Mientras que los mecanismos indirectos, se efectúan cuando las PGPR son capaces de inhibir el crecimiento de uno o más microorganismos fitopatógenos, debido a la síntesis de antibióticos o sideróforos (Vessey, 2003; Ortiz-Castro *et al.*, 2014), en conjunto estos mecanismos tienen potencial de mejorar la calidad de los frutos y la eficiencia del suministro de los fertilizantes sintéticos y plaguicidas (Kloepper *et al.*, 2004). Ciertos géneros bacterianos son los más comúnmente utilizados en la agricultura: *Acinetobacter* spp., *Aeromonas* spp., *Azospirillum* spp., *Bacillus* spp., *Erwinia* spp., *Flavobacterium* spp., *Burkholderia* spp., *Pseudomonas* spp., *Rhizobium* spp., *Serratia* spp., entre otros (Beneduzi *et al.*, 2008; Esitken *et al.*, 2010).

Por otro lado, el compost como sustrato orgánico aporta cantidades considerables de elementos nutritivos que podrían satisfacer la demanda de los cultivos, su aplicación conlleva una mejora en las propiedades físicas y químicas de los sustratos, lo cual se refleja en un mejor crecimiento, desarrollo y mayores rendimientos de los cultivos vegetales (Márquez-Hernández *et al.*, 2006). Según Márquez *et al.* (2008) el mezclar el compost con medios inertes se mejoran sus características físicas y químicas de los sustratos de crecimiento evitando la hipoxia, en este sentido, se permite suponer que la aplicación del compost, además de satisfacer la demanda nutritiva de los cultivos, favorece la calidad y actividad antioxidantes de los frutos. Adicionalmente, la producción de tomate en condiciones de invernadero es una opción para

aumentar la producción, en comparación a campo abierto (Márquez-Hernández *et al.*, 2013). En los sistemas de producción protegida se obtienen un mayor rendimiento y una mejora en la calidad de los productos, así también un uso eficiente de los fertilizantes y del agua (Moreno *et al.*, 2011). El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la inoculación de *Bacillus* sp., *Aeromonas* sp. y *Pseudomonas lini* utilizando dos sustratos base compost o arena de río, sobre el rendimiento y la calidad nutracéutica de frutos de tomate en invernadero.

## Materiales y métodos

El experimento se realizó, en el ciclo primavera-verano 2015, bajo invernadero en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Torreón, Coahuila, México (25° 05' y 26° 54' latitud norte, 101° 40' y 104° 45' longitud oeste, a una altitud de 1 139 m) (Schmidt, 1989). El invernadero cuenta con un área de 200 m<sup>2</sup>, es de forma semicircular, con cubierta de acrílico reforzado, piso de grava y sistema de enfriamiento automático mediante pared húmeda y extractores, la temperatura mínima y máxima al interior del invernadero fluctuó entre 17.4 y 32.6 °C respectivamente, mientras que la humedad relativa mínima y máxima osciló entre 30 y 70%.

Las tres PGPR utilizadas como inoculantes fueron; *Bacillus* sp., *Aeromonas* sp. y *Pseudomonas lini* (Palacio-Rodríguez *et al.*, 2017), las cuales se obtuvieron de la colección microbiana del Laboratorio de Ecología Microbiana de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez del estado de Durango, Gómez Palacio, Durango, México. Para la preparación de los inóculos bacterianos, las tres cepas fueron inoculadas individualmente en medio líquido Luria Bertani<sup>®</sup> y posteriormente colocadas en una incubadora con agitación de 200 rpm (Precisión Scientific 815<sup>®</sup>) por 24 h a 30 °C, las concentraciones bacterianas se ajustaron a  $1 \times 10^8$  UFC mL<sup>-1</sup> con buffer fosfato salino (PBS) al 0.5x.

El material vegetal que se utilizó fue tomate cv. Afrodita, tipo saladette de crecimiento indeterminado, el cual se sembró en bandejas de poliestireno de 200 cavidades utilizando como sustrato peat moss (Premier<sup>®</sup>), éstas se introdujeron en bolsas de polietileno negro por 72 h, aplicando cada 24 h riegos con un atomizador hasta drenar. La inoculación de las cepas bacterianas se realizó a los 12 días después de la emergencia de las plántulas, mediante el método de inmersión, durante un periodo de 5 min, en una suspensión bacteriana de 4 L, con una concentración de  $1 \times 10^8$  UFC mL<sup>-1</sup>, mientras que los tratamientos testigos solo se les suministró agua destilada.

Los sustratos evaluados consistieron en diferentes porcentajes de compost, arena de río y perlita: sustrato 1 (S1)= 50% de compost + 40% arena de río + 10% perlita y el sustrato 2 (S2)= 100% arena de río. La composición química de los sustratos se presenta en el Cuadro 1. De la interacción de los sustratos × PGPR se conformaron los siguientes tratamientos: T<sub>1</sub>: *Bacillus* sp. + S1; T<sub>2</sub>: *Aeromonas* sp. + S1; T<sub>3</sub>: *P. lini* + S1; T<sub>4</sub>: sin PGPR + S1 (testigo 1); T<sub>5</sub>: *Bacillus* sp. + S2; T<sub>6</sub>: *Aeromonas* sp. + S2; T<sub>7</sub>: *P. lini* + S2 y T<sub>8</sub>: sin PGPR + S2 (testigo 2). El trasplante se llevó a cabo a los 46 días después de la siembra, cuando las plantas presentaron una altura promedio de 15 cm, estableciendo una planta por macetas que consistieron en bolsa de polietileno negro con capacidad de 18 L, las cuales se rellenaron con los sustratos correspondientes.

**Cuadro 1. Análisis químico del compost y arena de río empleado como medio de crecimiento de tomate cv. Afrodita en invernadero.**

Sustrato	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Zn	Mn	pH	CE <sup>†</sup> (dS m <sup>-1</sup> )
	(mg kg <sup>-1</sup> )										
Compost	120.1	42	610.6	90	85	3	7.5	5.1	4.1	8.56	6.7
Arena de río	1.15	11.2	100.2	45	4.3	0.17	5.75	0.7	4.43	7.5	0.65

<sup>†</sup>= conductividad eléctrica.

Las macetas fueron colocadas en doble hilera con una separación de 1.6 m entre hiera, con arreglo tresbolillo, a una separación de 0.3 m, la densidad de siembra fue de cuatro plantas por metro cuadrado. La arena de río utilizada en todos los tratamientos fue lavada y esterilizada con una solución al 5% de hipoclorito de sodio, posteriormente fue lavada y secada al ambiente durante tres días. El desarrollo de cultivo fue a un solo tallo, con podas semanales y el control fitosanitario se realizó de manera preventiva, aplicando Cinna-Mix<sup>®</sup>, insumo aprobado para productos orgánicos (IFOAM, 2003). La polinización se realizó diariamente entre las 11:00 y 14:00 h al iniciar la floración y hasta el amarre del quinto racimo, de manera mecánica con un vibrador eléctrico.

El volumen de agua de riego se suministró a las macetas de acuerdo a las etapas fenológicas del cultivo, a partir de cuatro días después del trasplante (ddt) se aplicaron 0.5 L de agua maceta<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, posteriormente se incrementó a 0.8 y 1.9 L maceta<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, a los 30 y 71 ddt, respectivamente. La solución nutritiva empleada para los tratamientos sin inocular fue la recomendada por Castellanos y Ojodeagua (2009). La demanda nutricional del cultivo para los tratamientos inoculados con las PGPR fue cubierta utilizando Maxifrut y Maxiquel, ambos productos de la compañía BioCampo<sup>®</sup>, para aplicar macro y micro elementos, respectivamente.

Estos productos han sido aprobados por las normas de producción orgánica certificada IFOAM (2003). De ambos productos se prepararon soluciones madre a razón de 10 y 50 g en 20 L de agua de riego, y para la fertilización de las plantas por macetas se realizaron diluciones de 1 y 0.5 L en 1 000 L de agua, respectivamente. La dilución del Maxifrut se aplicó diario y Maxiquel cada semana.

Se cosecharon los frutos de tomate en un estado de madurez entre 30 y 60% para realizar las determinaciones de: sólidos solubles totales (SST), acidez titulable (expresado como porcentaje de ácido cítrico), contenido de licopeno, vitamina C, contenido de azúcares totales y azúcares reductores. El rendimiento se obtuvo por planta al cosechar, del primero al quinto racimo, los frutos de las plantas de cada tratamiento y replica correspondiente. Para la determinación de SST de los frutos se realizó con un refractómetro manual ATAGO PR-100 con escala de 0-32%, mientras que para la acidez titulable se utilizó la metodología de la AOAC (1990). El contenido de vitamina C, expresada en miligramos de ácido ascórbico 100 g<sup>-1</sup> fruto fresco (FF), se determinó según el método de la AOAC (1984). El contenido de azúcares totales se realizó por extracción alcohólica y se cuantificó por el método de Antrona (Witham *et al.*, 1971), obteniendo para los cálculos una curva estándar, expresando los resultados en miligramos de glucosa 100 g<sup>-1</sup> de FF.

La concentración de azúcares reductores se cuantificó por el método de Nelson (1944) y Somogyi (1952), los resultados se expresaron en mg de glucosa 100 g<sup>-1</sup> de FF. La extracción de licopeno se realizó mediante la metodología propuesta por Fish *et al.* (2002) utilizando hexano, acetona, etanol (2:1:1 v:v:v) y para el cálculo de licopeno se usó la ecuación de Javanmardi y Kubota (2006).

El diseño experimental utilizado fue completamente al azar con tres repeticiones, con arreglo factorial (2×4), en donde el factor A correspondió a los sustratos, mientras que el factor B a las PGPR. Los datos fueron analizados estadísticamente por análisis de varianza y las comparaciones de medias mediante la prueba Tukey ( $p \leq 0.05$ ) (SAS, 2004).

## Resultados y discusión

### Sólidos solubles totales, porcentaje de ácido cítrico, rendimiento y número de frutos

Los resultados indican que los sustratos utilizados en el presente trabajo provocaron que los frutos de tomate mostraran diferencias significativas en el contenido de SST y el porcentaje de ácido cítrico ( $p < 0.05$ ), no así para el rendimiento y número de frutos. De acuerdo al factor PGPR, no se observó diferencia significativa en el rendimiento, número de frutos y acidez titulable; sin embargo, presentó diferencia altamente significativa en el contenido de SST ( $p < 0.01$ ). En relación a la interacción sustratos×PGPR, se encontraron significancias estadísticas en el contenido de SST y el porcentaje de ácido cítrico ( $p < 0.05$ ), del mismo modo, se presentaron diferencias altamente significativas en el rendimiento y número de frutos ( $p < 0.01$ ) (Cuadro 2).

**Cuadro 2. Rendimiento, número de frutos, sólidos solubles totales y acidez titulable en frutos de tomate por efecto de diferentes sustratos y PGPR.**

Factor	Rendimiento (kg m <sup>-2</sup> )	Número de frutos (núm.)	SST (°Brix)	Acidez titulable (% de ácido cítrico)
Sustrato				
‘S1’	8.86 a	30.41 a	4.84 a	0.67 a
‘S2’	8.6 a	28.58 a	4.26 b	0.56 b
PGPR				
<i>Bacillus</i> sp.	9.84 a	29.83 a	4.9 a	0.63 a
<i>Aeromonas</i> sp.	8.72 a	30 a	4.5 b	0.64 a
<i>Pseudomonas lini</i>	7.93 a	27.33 a	4.6 b	0.61 a
Sin inocular	8.46 a	30.83 a	4.3 b	0.57 a
Sustratos×PGPR				
Significancia	**	**	*	*
CV (%)	16.47	14.31	4.04	8.58

Medias con letras iguales en una columna para cada factor no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $p \leq 0.05$ ); SST= sólidos solubles totales; S1= 50% de compost + 40% arena de río + 10% perlita; S2= 100% arena de río; PGPR= rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal; CV= coeficiente de variación; \* = significativo  $p < 0.05$ ; \*\* = altamente significativo  $p < 0.01$ .

El contenido de SST y el porcentaje de ácido cítrico en los frutos de tomate, se incrementaron al utilizar el sustrato S1, en 11.98 y 16.42% en relación al sustrato S2, respectivamente, éstos incrementos en los SST podrían estar relacionado con la presencia y disponibilidad de sales en el medio radical (Dorais *et al.*, 2001). Este comportamiento concuerda con lo señalado por Cuartero y Fernández-Muñoz (1999) quienes indican que el contenido de sales, presente en los abonos orgánicos, incrementa el contenido de SST en los frutos. Resultados similares fueron reportados por Gutiérrez-Miceli *et al.* (2007) quienes encontraron un mayor contenido de SST en frutos de tomate, al utilizar el compost como fuente de fertilización.

En este sentido, el contenido de SST registrado en frutos de plantas desarrolladas en el sustrato S1, fue superior 7.6 y 12.6% a los valores reportados por Rodríguez *et al.* (2009) quienes evaluaron frutos de tomate desarrollado en sustrato base compost:arena de río (50:50 v:v) más la aplicación de té de compost y Salas-Pérez *et al.* (2016) al evaluar la calidad nutraceutica de frutos de tomate en sustratos a base de compost: arena de río en invernadero, respectivamente. En el caso de la variable acidez titulable el mayor valor se presentó en frutos de tomate provenientes de plantas desarrollados en el sustrato S1, siendo superior al promedio de 0.027 porciento de ácido cítrico reportado por Vázquez *et al.* (2015), quienes evaluaron la calidad y el rendimiento de tomate en invernadero con diferentes proporciones de compost y té de compost. En cuanto al efecto del factor PGPR, el contenido de SST se incrementó al inocular la cepa *Bacillus* sp., registrando un incremento de 24.17% en relación al tratamiento sin inocular. Los resultados de SST fueron superiores a los reportados por Dursun *et al.* (2010) quienes encontraron un valor de 3.63 °Brix, al evaluar la aplicación del co-inoculante a base de *Pantoea agglomerans*, *Acinetobacter baumannii* y *Bacillus megaterium* en el cultivo de tomate.

En el Cuadro 3 se muestra la interacción sustratos×PGPR, donde se indica que el mayor contenido de SST se encontró en el tratamiento T<sub>1</sub> (*Bacillus* sp. + S1) con una media de 5.36 °Brix, siendo superior en 17.35 y 23.51% a los tratamientos T<sub>4</sub> y T<sub>8</sub> (testigos), respectivamente. Este comportamiento coincide con otros investigadores quienes reportan que los sustratos orgánicos más la inoculación de PGPR generan frutos de mayor contenido de SST (Orhan *et al.*, 2006), esto puede deberse al incremento de la salinidad en el medio radical (Dorais *et al.*, 2001); además, se ha demostrado un aumento en la absorción de elementos nutritivos por las plantas cuando son inoculadas con PGPR, este aumento se ha atribuido a la producción de fitohormonas en el medio de crecimiento, que estimula el desarrollo de las raíces y por ende una mejor absorción de agua y de elementos nutritivos (Ordookhani *et al.*, 2013).

Los SST de los frutos de tomate desarrollados en los tratamientos en estudio son considerados adecuados ya que superaron al valor óptimo (4 °Brix) de referencia para consumo en fresco (Santiágo *et al.*, 1998). Por otro parte, el mayor porcentaje de ácido cítrico se reportó en los tratamientos T<sub>2</sub> (*Aeromonas* sp. + S1), T<sub>5</sub> (*Bacillus* sp. + S2) y T<sub>7</sub> (*Pseudomonas lini* + S2). Asimismo, los resultados del presente estudio coinciden con los obtenido por del Amor *et al.* (2008) quienes indican una mayor concentración de ácido cítrico en frutos del chile (*Capsicum annuum* L.) desarrollados en plantas inoculadas con *Azospirillum brasilense* y *Pantoea dispersa*, en comparación con los frutos de plantas sin inocular. En términos generales, los resultados confirman la importancia de la aplicación de biofertilizantes base PGPR y el uso de abonos orgánicos como el compost sobre la calidad del fruto de tomate.

**Cuadro 3. Efecto de la interacción sustratos×PGPR en la producción y la calidad de frutos de tomate desarrollados bajo condiciones de invernadero.**

Tratamiento	Número de frutos (núm.)	Rendimiento (kg m <sup>-2</sup> )	SST (°Brix)	Acidez titulable (% ácido cítrico)
T <sub>1</sub> - <i>Bacillus</i> sp. + S1	35 a	11.86 a	5.36 a	0.7 ab
T <sub>2</sub> - <i>Aeromonas</i> sp. + S1	32.33 abc	9.78 ab	4.67 bc	0.72 a
T <sub>3</sub> - <i>Pseudomonas lini</i> + S1	34.66 ab	9.77 ab	4.89 ab	0.69 ab
T <sub>4</sub> - Sin PGPR + S1	30 abc	8.11 ab	4.43 bcd	0.58 bc
T <sub>5</sub> - <i>Bacillus</i> sp. + S2	24.66 c	7.8 ab	4.36 cd	0.56 bc
T <sub>6</sub> - <i>Aeromonas</i> sp. + S2	27.66 abc	7.66 b	4.36 cd	0.56 bc
T <sub>7</sub> - <i>Pseudomonas lini</i> + S2	24.66 c	7.75 b	4.23 cd	0.53 c
T <sub>8</sub> - sin PGPR + S2	27 bc	7.15 b	4.1 d	0.58 abc
Media	29.5	8.7	4.55	0.62
DMSH	7.738	4.0705	0.5206	0.1499

Valores con letras iguales en cada columna, son iguales de acuerdo con la prueba Tukey ( $p \leq 0.05$ ); SST= sólidos solubles totales; S1=50% de compost + 40% arena de río + 10% perlita; S2=100% arena de río; PGPR= rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. DMSH= diferencia mínima significativa honesta.

Respecto a la interacción sustratos × PGPR, el rendimiento presentó el mayor valor con 11.86 kg m<sup>-2</sup> en el tratamiento T<sub>1</sub> (*Bacillus* sp.+S1) el cual fue superior en 31.61 y 39.71% en comparación a los tratamientos T<sub>4</sub> y T<sub>8</sub>, respectivamente (Cuadro 3), este comportamiento podría deberse a que las PGPR estimulan el rendimiento de los cultivos vegetales, por diversos mecanismos como son la producción de sustancias estimuladoras del crecimiento vegetal (fitohormonas) tales como el ácido indol-3-acético (AIA), ácido giberélico, etileno y ácido abscísico (Arcos y Zuñiga, 2015).

En tanto el tratamiento T<sub>1</sub> (*Bacillus* sp. + S1) obtuvo un incremento en el número de frutos, obteniendo 35 frutos por planta; sin embargo, resultaron estadísticamente similares a los tratamientos T<sub>2</sub> (*Aeromonas* sp. + S1) y T<sub>3</sub> (*P. lini* + S1), este resultado señala que las tres cepas bacterianas y el compost, se consideran una opción para incrementar el número de frutos por planta, por ende el rendimiento del cultivo de tomate en invernadero.

Lo cual coincide con Karakurt *et al.* (2011), quienes mencionan que las PGPR tienen un potencial para aumentar el número de frutos por planta y la calidad de los frutos, debido a que estas bacterias son capaces de sintetizar fitohormonas como son citoquininas y AIA, además son fijadoras de nitrógeno y solubilizadoras de fosfato y así como también inhiben el desarrollo de microorganismos fitopatógenos. Sin embargo, en los tratamientos donde se utilizó el sustrato S2 (100% arena de río) se observó una reducción en el número de frutos por planta, tanto en los tratamientos inoculados con PGPR como en el tratamiento T<sub>8</sub> (testigo 2). Por su parte, Karlidag *et al.* (2010) indican que las PGPR pueden tener potencial para ser usadas para incrementar el crecimiento de la planta, el rendimiento de frutos y la nutrición de las plantas bajo condiciones de salinidad.

## Calidad nutracéutica

El análisis estadístico indica que en el factor sustratos; existió diferencia significativa en la variable licopeno ( $p < 0.05$ ), asimismo, se registró diferencia altamente significativa en azúcares totales y vitamina C ( $p < 0.01$ ); sin embargo, en azúcares reductores no se encontró significancia. Respecto al factor PGPR los contenidos de licopeno, azúcares totales, ácido ascórbico y azúcares reductores mostraron diferencias altamente significativas ( $p < 0.01$ ). La interacción sustratos×PGPR resultó significativa para licopeno ( $p < 0.05$ ), y altamente significativa en las variables azúcares totales y reductores, así como en el contenido de ácido ascórbico ( $p < 0.01$ ) (Cuadro 4).

En el Cuadro 4 se muestra que el sustrato S1 registró un incremento de 9.18, 22.05 y 12.68% en el contenido de licopeno, ácido ascórbico y azúcares totales, respectivamente, respecto al sustrato S2. Este comportamiento puede atribuirse al contenido de sales presente en los abonos orgánicos, con lo cual se puede favorecer un incremento de salinidad del medio radical (Cuartero y Fernández-Muñoz, 1999), esta característica disminuye la absorción de agua y de nutrientes; lo que implica un estrés iónico y osmótico que afecta al metabolismo de la planta, pero se mejora la calidad nutracéutica de los frutos (Ruiz-López *et al.*, 2010; Díaz-Franco *et al.*, 2016).

**Cuadro 4. Contenidos de licopeno, azúcares totales, azúcares reductores y vitamina C en frutos de tomate por efecto de diferentes sustratos y PGPR.**

Factor	Licopeno (mg 100 g <sup>-1</sup> FF)	Azúcares totales Azúcares reductores		Vitamina C (mg de ácido ascórbico 100 g <sup>-1</sup> FF)
		(mg de glucosa 100 g <sup>-1</sup> FF)		
Sustrato				
'S1'	4.38 a	3.55 a	1.89 a	9.48 a
'S2'	3.95 b	3.1 b	1.87 a	7.39 b
PGPR				
<i>Bacillus</i> sp.	5.02 a	3.52 a	1.94 a	9.45 a
<i>Aeromonas</i> sp.	4.46 ab	3.62 a	2.03 a	8.72 a
<i>Pseudomonas lini</i>	4.29 b	3.44 a	1.98 a	8.42 ab
Sin inocular	2.88 c	2.71 b	1.57 b	7.18 b
Sustratos×PGPR				
Significancia	*	*	**	**
CV (%)	9.56	8.37	3.48	9.31

Medias con letras iguales en una columna para cada factor no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $p \leq 0.05$ ); S1= 50% de compost + 40% arena de río + 10% perlita; S2= 100% arena de río; PGPR= rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal; CV= coeficiente de variación; \* = significativo  $p < 0.05$ , \*\* = altamente significativo  $p < 0.01$ .

La mayor acumulación de azúcares totales en los frutos podría deberse a la disminución en la acumulación de agua por los frutos, en respuesta a esto, los frutos acumulan algunos azúcares (glucosa, fructosa y sacarosa), así mantienen en equilibrio el potencial osmótico y aumentan la absorción de agua (Plaut *et al.*, 2004). En respecto al factor PGPR, el mayor contenido de licopeno se presentó al inocular *Bacillus* sp., incrementando 42.63% en comparación al tratamiento sin

inocular. Acorde con Ordoorkhani *et al.* (2013) el contenido de licopeno en frutos se incrementa debido a que las PGPR tienen la capacidad de reducir los efectos negativos ocasionados por un estrés biótico y abiótico en las plantas.

En la variable azúcares reductores el mayor incremento se reportó al inocular la cepa *Aeromonas* sp., con un valor de 2.03 mg 100 g<sup>-1</sup> FF, superando en 22.66% al tratamiento sin inocular (Cuadro 4). Este comportamiento puede atribuirse que las PGPR tienden a aumentar la eficiencia fotosintética, y en consecuencia el contenido de clorofila debido a los altos niveles de captación de CO<sub>2</sub> y por lo tanto hay mayor acumulación de azúcares en los frutos (Makino y Mae, 1999; Kai y Piechulla, 2009; Karlidag *et al.*, 2010). El contenido de ácido ascórbico se incrementó al inocular *Bacillus* sp., aunque no fue distinto desde el punto de vista estadístico al usar *Aeromonas* sp., por su parte, los azúcares totales la inoculación de las tres cepas bacterianas registraron un comportamiento estadísticamente igual, por lo que se presume que las tres PGPR son aptas para el cultivo de tomate. En el presente estudio, la cepa *Bacillus* sp. fue la que más influyó sobre los contenidos de SST, licopeno y azúcares totales en frutos de tomate producido en condiciones de invernadero, lo cual pudo estar relacionado con la capacidad de cada microorganismo de sintetizar fitohormonas (Adriano *et al.*, 2011).

En cuanto a la interacción sustratos×PGPR, el tratamiento T<sub>1</sub> (*Bacillus* sp. + S1) presentó un mayor incremento del contenido de licopeno con una media de 5.65 mg 100 g<sup>-1</sup> FF superando en 42.83 y 55.04% a los tratamientos control T<sub>4</sub> y T<sub>8</sub> (Cuadro 5). Resultados similares fueron reportados Kumar y Sharma (2014), quienes evaluaron la cepa *Azotobacter* + vermicompost + NPK 300 kg ha<sup>-1</sup> en dos ciclos del cultivo de tomate, reportaron valores de 5.26 y 5.28 mg 100 g<sup>-1</sup> FF, respectivamente.

**Cuadro 5. Efecto de la interacción sustratos×PGPR en la calidad nutracéutica de frutos de tomate desarrollados bajo condiciones de invernadero.**

Tratamiento	Licopeno (mg 100 g <sup>-1</sup> FF)	Azúcares totales Azúcares reductores		Vitamina C (mg de ácido ascórbico 100 g <sup>-1</sup> FF)
		(mg de glucosa 100 g <sup>-1</sup> FF)		
T <sub>1</sub> - <i>Bacillus</i> sp. + S1	5.65 a	3.4 ab	2.07 a	11.28 a
T <sub>2</sub> - <i>Aeromonas</i> sp. + S1	4.25 bc	3.95 a	2.04 a	9.98 a
T <sub>3</sub> - <i>Pseudomonas lini</i> + S1	4.41 b	3.81 ab	1.98 ab	9.49 ab
T <sub>4</sub> - Sin PGPR + S1	3.23 cd	3.04 bc	1.47 d	7.18 c
T <sub>5</sub> - <i>Bacillus</i> sp. + S2	4.41 b	3.65 ab	1.81 bc	7.61 bc
T <sub>6</sub> - <i>Aeromonas</i> sp. + S2	4.67 ab	3.3 ab	2.02 a	7.45 bc
T <sub>7</sub> - <i>Pseudomonas lini</i> + S2	4.19 bc	3.08 bc	1.99 ab	7.33 bc
T <sub>8</sub> - Sin PGPR + S2	2.54 d	2.38 c	1.67 c	7.18 c
Media	4.17	3.33	1.88	8.44
DMSH	1.1259	0.7873	0.1858	2.2204

Valores con letras iguales en cada columna, son iguales de acuerdo con la prueba Tukey ( $p \leq 0.05$ ); S1= 50% de compost + 40% arena de río + 10% perlita; S2= 100% arena de río; PGPR= rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. DMSH= diferencia mínima significativa honesta.

También se vio incrementado el contenido de ácido ascórbico con el tratamiento T<sub>1</sub> (*Bacillus* sp. + S1) con media de 11.28 mg 100 g<sup>-1</sup> FF superando en 36.34 a los tratamientos T<sub>4</sub> y T<sub>8</sub>, comportamiento que coincide con lo establecido por Molla *et al.* (2012), quienes reportan que el contenido de ácido ascórbico en frutos de tomate aumenta debido al uso biofertilizantes enriquecidos con *Trichoderma harzianum* y la aplicación de compost. Los frutos producidos orgánicamente presentar concentraciones altas de ácido absorbido, licopeno y bajas concentraciones de nitratos en comparación a frutos producidos convencionalmente (Worthington, 2001).

En relación a los azúcares totales el mayor contenido se reportó en la interacción *Aeromonas* sp. + S1 (T<sub>2</sub>); sin embargo, no difirió estadísticamente de los tratamientos T<sub>1</sub> (*Bacillus* sp. + S1), T<sub>3</sub> (*P. lini* + S1), T<sub>5</sub> (*Bacillus* sp. + S2) y T<sub>6</sub> (*Aeromonas* sp. + S2) (Cuadro 5). De acuerdo con Kumar *et al.* (2015), los azúcares totales se incrementan en frutos de fresa (*Fragaria × ananassa* cv. Chandler) al inocular PGPR más la aplicación de vermicompost en comparación a plantas control. Para los azúcares reductores el mayor incremento se obtuvo en el tratamiento T<sub>1</sub> (*Bacillus* sp. + S1), aunque fue estadísticamente iguales a los tratamientos T<sub>2</sub> (*Aeromonas* sp. + S1), T<sub>3</sub> (*P. lini* + S1), T<sub>6</sub> (*Aeromonas* sp. + S2) y T<sub>7</sub> (*P. lini* + S2).

Este comportamiento coincide con lo establecido por Pirlak y Köse (2009), quienes indican que al aplicar las PGPR y abonos orgánicos en plantas de fresa, tienen un potencial de incrementar el contenido de azúcares reductores en los frutos debido a la producción de sustancias estimuladoras del crecimiento. Lo anterior permite suponer que el uso del compost y la inoculación de las PGPR son una opción para incrementar los contenidos de licopeno, azúcares totales y ácido ascórbico en frutos de tomate cv. Afrodita, lo cual es deseable ya durante los últimos años han recibido gran interés por sus propiedades antioxidantes en relación con los radicales libres, lo que sugiere que estos previenen los riesgos de adquirir enfermedades crónicas como el cáncer y enfermedades cardiovasculares (Waliszewski y Blasco, 2010).

## Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos, se concluye que el uso del sustrato S1, tuvo efectos positivos en los contenidos de SST, licopeno, azúcares totales y reductores, ácido ascórbico y el porcentaje de ácido cítrico de frutos de tomate cv. Afrodita. La inoculación de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) aumentaron los contenidos de sólidos solubles totales, licopeno, azúcares reductores y ácido ascórbico en frutos de tomate producidos en invernadero. El uso del sustrato a base de 50% compost + 40% arena de río + 10% perlita y la inoculación específicamente de la cepa *Bacillus* sp. incrementaron el rendimiento y la calidad nutracéutica de los frutos de tomate. Por tanto, los biofertilizantes a base de PGPR y el compost podrían ser una alternativa viable para mejorar la calidad nutracéutica de frutos, sin disminuir el rendimiento de tomate bajo condiciones de invernadero.

## Agradecimientos

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar estudios de maestría Núm. 001924, CVU No. 662671.

## Literatura citada

- Adriano, A. M. d. L.; Jarquín, G. R.; Hernández, R. C.; Salvador, F. M. y Monreal, V. C. T. 2011. Biofertilización de café orgánico en etapa de vivero en Chiapas, México. *Rev. Mex. Cienc. Agrar.* 2(3):417-431.
- Ahemad, M. and Kibret, M. 2013. Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. *Journal of King Saud University-Science.* 26(1):1-20.
- AOAC (Association of Official Analytical Chemist). (1984). Official methods of analysis (13<sup>th</sup> Ed.). Arlington, Virginia, USA. 1023 p.
- AOAC (Association of Official Analytical Chemist). (1990). Official methods of analysis (15<sup>th</sup> Ed.). Arlington, Virginia, USA. 1298 p.
- Arcos, J. y Zuñiga, D. 2015. Rizobacterias promotoras de crecimiento de plantas con capacidad para mejorar la productividad en papa. *Rev. Latinoam. Papa.* 20(1):18-31.
- Ashrafuzzaman, M.; Akhtar, H. F.; Razi, I. M.; Anamul, H. M.; Zahurul, I. M.; Shahidullan, S. M. and Meon, S. 2009. Efficiency of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) for the enhancement of rice growth. *Afr. J. Biotechnol.* 8(7):1247-1252.
- Beneduzi, A.; Peres, D.; Vargas, K. L.; Zanettini, B. M. H. and Passaglia, P. L. M. 2008. Evaluation of genetic diversity and plant growth promoting activities of nitrogen-fixing bacilli isolated from rice fields in South Brazil. *Appl. Soil Ecol.* 39(3):311-320.
- Castellanos, Z. J. y Ojodeagua, J. L. 2009. Formulacion de la solucion nutritiva. *In: Manual de produccion de tomate en invernadero.* Castellano, Z. J. (Ed.). Celaya, Guanajuato, Mexico: Intagri, S. C. 131-156 pp.
- Cuartero, J. and Fernández, M. R. 1999. Tomato and salinity. *Sci. Hortic.* 78(1-4):83-125.
- Amor, F. M.; Serrano, M. A.; Fortea, M. I.; Legua, P. and Núñez, D. E. 2008. The effect of plant-associative bacteria (*Azospirillum* and *Pantoea*) on the fruit quality of sweet pepper under limited nitrogen supply. *Scientia Horticulturae.* 117(3):191-196.
- Díaz, F. A.; Ortiz, Ch. F. E. and Espinosa, E. M. 2016. Mycorrhizal symbiosis and growth of sorghum plants irrigated with saline water. *Rev. Chapingo Ser. Zonas Áridas.* 15(1):55-64.
- Dorais, M.; Papadopoulos, P. A. and Gosselin, A. 2001. Influence of electric conductivity management on greenhouse tomato yield and fruit quality. *Agronomie, EDP Sciences.* 21(4):367-383.
- Dursun, A.; Ekinci, M. and Dönmez, M. F. 2010. Effects of foliar application of plant growth promoting bacterium on chemical contents, yield and growth of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) and Cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Pak. J. Bot.* 42(5):3349-3356.
- Esitken, A.; Yildiz, H. E.; Ercisli, S.; Donmez, M. F.; Turan, M. and Gunes, A. 2010. Effects of plant growth promoting bacteria (PGPB) on yield, growth and nutrient contents of organically grown strawberry. *Sci. Hortic.* 124(1):62-66.
- Fish, W. W.; Perkins, V. P. and Collins, J. K. 2002. A quantitative assay for lycopene that utilizes reduced volumes of organic solvents. *J. Food Comp. Anal.* 15(3):309-317.
- George, B.; Kaur, C.; Khurdiya, D. S. and Kapoor, H. C. 2004. Antioxidants in tomato (*Lycopersium esculentum*) as a function of genotype. *Food Chem.* 84(1):45-51.
- Gutiérrez, M. F. A.; Santiago, B. J.; Montes, M. J. A.; Nafate, C. C.; Abud, A., M.; Llaven, M. A. O.; Rincon, R. R. and Dendooven, L. 2007. Vermicompost as a soil supplement to improve growth, yield and fruit quality of tomato (*Lycopersicum esculentum*). *Bio. Technol.* 98(15):2781-2786.

- IFOAM (International Federation of Organic Agriculture Movements). 2003. Norma para la producción y procesamiento orgánico. Die Deutsche Bibliothek. Frankfurt, Germany. 158 p.
- Javanmardi, J. and Kubota, C. 2006. Variation of lycopene, antioxidant activity, total soluble solids and weight loss of tomato during postharvest storage. *Postharvest Biol. Technol.* 41(2):151-155.
- Kai, M. and Piechulla, B. 2009. Plant growth promotion due to rhizobacterial volatiles-an effect of CO<sub>2</sub>?. *FEBS letters.* 583(21):3473-3477.
- Karakurt, H.; Kotan, R.; Dadaşoğlu, F.; Aslantaş, R. and Şahin, F. 2011. Effects of plant growth promoting rhizobacteria on fruit set, pomological and chemical characteristics, color values, and vegetative growth of sour cherry (*Prunus cerasus* cv. Kütahya). *Turkish J. Biol.* 35(3):283-291.
- Karlıdag, H.; Esitken, A.; Yildirim, E.; Donmez, M. F. and Turan, M. 2010. Effects of plant growth promoting bacteria on yield, growth, leaf water content, membrane permeability, and ionic composition of strawberry under saline conditions. *J. Plant Nutr.* 34(1):34-45.
- Kloepper, J. W.; Reddy, M. S.; Rodríguez, K. R.; Kenney, D. S.; Kokalis, B. N.; Martinez, O. N. and Vavrina, C. S. 2004. Application for rhizobacteria in transplant production and yield enhancement. *Acta Hort.* 631:217-229.
- Kloepper, J. W. and Schroth, M. N. 1978. Plant growth promoting rhizobacteria on radishes. *In: Proceeding of the 4<sup>th</sup> International Conference on Plant Pathogenic Bacteria.* Gilbert-Clorey (Ed.). 2:879-882.
- Kumar, N.; Singh, H. K. and Mishra, P. K. 2015. Impact of organic manures and biofertilizers on growth and quality parameters of Strawberry cv. Chandler. *Ind. J. Sci. Technol.* 8(15):1-6.
- Kumar, R. and Sharma, K. M. 2014. Effect of soilless growing media, biofertilizers and fertigation levels on greenhouse tomato production. *J. Hortic.* 9(2):408-411.
- López, M. J. D.; Díaz, E. A.; Martínez, R. E. y Valdez, C. R. D. 2001. Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas de suelo y rendimiento en maíz. *Terra Latinoam.* 19(4):293-299.
- Makino, A. and Mae, T. 1999. Photosynthesis and plant growth at elevated levels of CO<sub>2</sub>. *Plant Cell Physiol.* 40(10):999-1006.
- Márquez, H. C.; Cano, R. P.; Chew, M. Y. L.; Moreno, R. A. y Rodríguez, D. N. 2006. Sustratos en la producción orgánica de tomate cherry bajo invernadero. *Revi. Chapingo Ser. Hortic.* 12(2):183-188.
- Márquez, H. C.; Cano, R. P.; Figueroa, V. U.; Avila, D. J. A.; Rodríguez, D. N. y García, H. J. L. (2013). Rendimiento y calidad tomate fuentes orgánicas de fertilización en invernadero. *Phyton.* 82(1):55-61.
- Márquez, H. C.; Cano, R. P. y Rodríguez, D. N. 2008. Uso de sustratos orgánicos para la producción de tomate en invernadero. *Agric. Téc. Méx.* 34(1):69-74.
- Molla, A. H.; Haque, M.; Haque, A. and Ilias, G. N. M. 2012. *Trichoderma*-Enriched biofertilizer enhances production and nutritional quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) and minimizes NPK fertilizer use. *Agric. Res.* 1(3):265-272.
- Moreno, R. A.; Aguilar, D. J. y Luévano, G. A. 2011. Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Rev. Mex. Agron.* 15(29):763-774.
- Nelson, N. 1944. A Photometric adaptation of the Somogyi Method for the determination of glucose. *J. Biol. Chem.* 153:375-380.
- Ordookhani, K.; Moezi, A.; Khavazi, K. and Rejali, F. 2013. Effect of plant growth promoting rhizobacteria and mycorrhiza on tomato fruit quality. *Acta Hort.* 989(1):91-96.

- Orhan, E.; Esitken, A.; Ercisli, S.; Turan, M. and Sahin, F. 2006. Effects of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on yield, growth and nutrient contents in organically growing raspberry. *Sci. Hortic.* 111(1):38-43.
- Ortíz, C. R.; Contreras, C. H. A.; Macías, R. L. and López, B. J. 2014. The role of microbial signals in plant growth and development. *Plant Signaling & Behavior.* 4(8):701-712.
- Palacio, R. R.; Coria, A. J. L.; López, B. J.; Sánchez, S. J.; Muro, P. G.; Castañeda, G. G. and Sáenz, M. J. 2017. Halophilic rhizobacteria from *Distichlis spicata* promote growth and improve salt tolerance in heterologous plant hosts. *Symbiosis.* 73(3):179-189
- Pii, Y.; Mimmo, T.; Tomasi, N.; Terzano, R.; Cesco, S. and Crecchio, C. 2015. Microbial interactions in the rhizosphere: beneficial influences of plant growth-promoting rhizobacteria on nutrient acquisition process. A review. *Biol. Fertility Soils.* 51(4):403-415.
- Pirlak, L. and Köse, M. 2009. Effects of plant growth promoting rhizobacteria on yield and some fruit properties of strawberry. *J. Plant Nutr.* 32(7):1173-1184.
- Plaut, Z.; Grava, A.; Yehezkel, C. and Matan, E. 2004. How do salinity and water stress affect transport of water, assimilates and ions to tomato fruits?. *Physiol. Plantarum.* 122(4):429-442.
- Pretty, J. 2008. Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences.* 363(1491):447-465.
- Rodríguez, D. N.; Cano, R. P.; Figueroa, V. U.; Favela, C. E.; Moreno, R. A.; Márquez, H. C.; Ochoa, M. E. y Preciado, R. P. 2009. Uso de abonos orgánicos en la producción tomate en invernadero. *Terra Latinoa.* 27(4):319-327.
- Ruiz, L. G. A.; Qüesta, A. G. y Rodríguez, S. d. C. 2010. Efecto de luz UV-C sobre las propiedades antioxidantes y calidad sensorial de repollo minimamente procesado. *Rev. Iberoam. Tecnol. Postcosecha.* 11(1):101-118.
- Salas, P. L.; González, F. J. A.; García, C. M.; Sifuentes, I. E.; Parra, T. S. y Preciado, R. P. 2016. Calidad biofísica y nutracéutica de frutos de tomate producido con sustratos orgánicos. *Nova Scientia.* 8(17):310-325.
- Santiágo, J.; Mendoza, M. y Borrego, F. 1998. Evaluación de tomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill) en invernadero: criterios fenológicos y fisiológicos. *Agron. Mesoam.* 9(1):59-65.
- Schmidt, R. H. 1989. The arid zones of México: climatic extremes and conceptualization of the Sonoran Desert. *J. Arid Environ.* 16(1): 241-256.
- Somogyi, M. 1952. Notes on sugar determination. *J. Biol. Chem.* 195:19-23.
- Statistical Analysis System (SAS). (2004). SAS software version 9.1. SAS Institute, Inc. Cary, NC, USA.
- Vázquez, V. P.; García, L. M. Z.; Navarro, C. M. C. y García, H. D. 2015. Efecto de la composta y té de composta en el crecimiento y producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en invernadero. *Rev. Mex. Agron.* 19(36):1351-1356.
- Vessey, K. J. 2003. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil.* 255(2):571-586.
- Waliszewski, K. N. and Blasco, G. 2010. Propiedades nutraceúticas del licopeno. *Salud Pública de México.* 53(3):254-265.
- Witham, H. F.; Blaydes, D. F. and Devlin, R. M. 1971. *Experiments in plant physiology.* Van Nostrand Reinhold C. New York, USA. 245 pp.
- Worthington, V. 2001. Nutritional quality of organic versus conventional fruits, vegetables, and grains. *J. Alternative and Complementary Medecine.* 7(2):161-173.