



Tasas reducidas de fertilización química y un bioestimulante microbiano en frutos de chile habanero rojo (*Capsicum chinense* Jacq.) †

[Reduced chemical fertilizer rates and a microbial biostimulant in red habanero pepper fruits (*Capsicum chinense* Jacq.)]

J. Adame-García¹, F. D. Murillo-Cuevas^{1*}, J. A. Fernández-Viveros¹,
A. E. Rivera-Meza¹ and H. Cabrera-Mireles²

¹Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. Km 4.5 Carretera Cardel-Chachalacas, Úrsulo Galván. CP 91667, Veracruz. México. E-mail: jacel.ag@ugalvan.tecnm.mx; felix.mc@ugalvan.tecnm.mx;

jose.fv@ugalvan.tecnm.mx; adriana.rm@ugalvan.tecnm.mx

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, CIRGOC, Campo Experimental Cotaxtla, Carretera Federal Veracruz-Córdoba, km. 34.5. Medellín de Bravo. CP. 94992, Veracruz, México. E-mail:

cabo.cabrera50@gmail.com

* Corresponding author

SUMMARY

Background. The habanero pepper is a crop that requires high chemical fertilization to significantly increase its production, such that a significant loss in production is related to nutrient deficiency. In addition to this, producers increase the doses and use of synthetic fertilizers, which can be inefficient, since a large amount of the applied fertilizer escapes into the environment through leaching, contaminating water and soil. **Objective.** To evaluate the effect of a microbial biostimulant on the size of habanero pepper fruits and their production under reduced chemical fertilization rates. **Methodology.** The study was carried out at the Úrsulo Galván Technological Institute from May to December 2024. Five treatments were evaluated: T1) 100 % chemical (FQ100); T2 75 % chemical + biostimulant (FQ75+B); T3) 50 % chemical + biostimulant (FQ50 + B); T4) chemical 75 % (FQ75) and T5) chemical 50 % (FQ50). The biostimulant was formulated from a combination of bacteria (*Bacillus subtilis* FDMC1, *Stenotrophomonas* sp. JAG2, *B. wiedmannii* JAG3, *Priestia megaterium* JAFV4, and *P. megaterium* AERM5). The response variables were weight, equatorial and polar diameter of the fruits, in addition to the production in weight of the total fruits per plant per treatment. **Results.** A decrease in fertilization dose from 75 % to 50 % without biostimulant applications reduce the size and weight of the habanero pepper fruits, as well as the production per plant; however, with the applications of the biostimulant and a chemical fertilization at 75 %, the weight and dimensions of the fruit and the production per plant were maintained. Reduce chemical fertilization rates, without biostimulant applications, significantly affected the yield and quality of red habanero peppers. **Implications.** Applications of the microbial biostimulant resulted in a 25 % reduction in chemical fertilization, achieving habanero pepper fruit production and quality equal to that achieved with 100 % fertilization. **Conclusions.** Applications of the biostimulant with reduced fertilization rates of 50 % and 75 % in red habanero peppers significantly increased fruit yield and size compared to those obtained without applications. **Key words:** Vegetables; production; *Bacillus subtilis*; *Stenotrophomonas*; *Priestia megaterium*.

RESUMEN

Antecedentes. El chile habanero es un cultivo que requiere una fertilización química alta para aumentar significativamente su producción, de tal manera que una pérdida significativa en la producción se relaciona con una deficiencia nutrimental. Aunado a esto, los productores aumentan las dosis y uso de los fertilizantes sintéticos, lo que puede ser ineficiente, ya que una buena cantidad del fertilizante aplicado se escapa al ambiente por lixiviación, contaminando agua y suelo. **Objetivo.** Evaluar el efecto de un bioestimulante microbiano en las dimensiones de frutos de chile habanero y su producción bajo tasas reducidas de fertilización química. **Metodología.** El trabajo se realizó en

† Submitted April 11, 2025 – Accepted May 11, 2026. <http://doi.org/10.56369/tsaes.6284>



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

ISSN: 1870-0462.

ORCID = J. Adame-García: <http://orcid.org/0000-0002-1982-1314>; F.D. Murillo-Cuevas: <http://orcid.org/0000-0001-5078-6724>; J.A. Fernández-Viveros: <http://orcid.org/0000-0002-4517-1386>; A.E. Rivera-Meza: <http://orcid.org/0000-0003-4972-2461>; H. Cabrera-Mireles: <http://orcid.org/0000-0002-1898-4402>

el Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván, durante mayo-diciembre 2024. Los tratamientos evaluados fueron cinco: T1) química 100 % (FQ100); T2) química 75 % + bioestimulante (FQ75+B); T3) química 50 % + bioestimulante (FQ50+B); T4) química 75 % (FQ75) y T5) química 50 % (FQ50). El bioestimulante estaba formulado de una combinación de bacterias (*Bacillus subtilis* FDMC1, *Stenotrophomonas* sp. JAG2, *B. wiedmannii* JAG3, *Priestia megaterium* JAFV4, y *P. megaterium* AERM5). Las variables de respuesta fueron peso, diámetro ecuatorial y polar de los frutos. Además de la producción en peso del total de frutos por planta por tratamiento. **Resultados.** Una disminución en la dosis de fertilización del 75 % y 50 % sin aplicaciones de bioestimulante redujo el tamaño y peso de los frutos de chile habanero, así como la producción por planta; sin embargo, con las aplicaciones del bioestimulante y una fertilización química al 75 %, se mantuvo el peso y dimensiones del fruto y la producción por planta. Las tasas reducidas de fertilización química, sin aplicaciones del bioestimulante, afectaron significativamente el rendimiento y calidad de los frutos de chile habanero rojo. **Implicaciones.** Con las aplicaciones del bioestimulante microbiano se obtiene un ahorro del 25 % en la fertilización química, lográndose una producción y calidad de frutos de chile habanero igual a la alcanzada con un 100 % de la fertilización. **Conclusiones.** Las aplicaciones del bioestimulante con tasas reducidas de fertilización al 50 y 75 % en chile habanero rojo, incrementaron significativamente la producción y dimensiones de los frutos en comparación a lo obtenido sin aplicaciones.

Palabras clave: Hortalizas; producción; *Bacillus subtilis*; *Stenotrophomonas*; *Priestia megaterium*.

INTRODUCCIÓN

Actualmente los sistemas agrícolas basados en los altos insumos de fertilizantes químicos incrementan significativamente los costos de producción y provocan problemas de contaminación ambiental y disminución en la fertilidad de los suelos (Estrada-Herrera *et al.*, 2017; Cotler *et al.*, 2020; Galindo *et al.*, 2020; Guerrero y Guevara, 2021). De tal forma que, el desarrollo de los sistemas agrícolas, hoy en día, deben consistir en una mayor productividad del suelo cultivado, un menor costo de producción y una mayor eficiencia de los insumos, sin contaminar el suelo, las aguas subterráneas y la calidad de los vegetales.

En nuestro país el cultivo de hortalizas es una de las actividades productivas que capta un mayor número de divisas en el sector agroalimentario de exportación (Cedillo-Portugal, 2018). Además, es una fuente de recursos económicos y de empleos en el campo. Las hortalizas ocupan el 20 % de la producción agrícola nacional, el chile verde es el de mayor producción con 3,237,924.93 toneladas, de los cuales el habanero contribuye con 30,056.46 toneladas, los estados de mayor producción son Sinaloa, Yucatán, Campeche, Tabasco, Quintana Roo, Chiapas y Veracruz (SIAP, 2023). El chile habanero se considera el más picante del mundo, tiene un alto contenido de capsaicina, potasio y vitamina C, debido a sus distintas propiedades, es utilizado en rubros diferentes como la gastronomía, medicina e industria química (FIRCO, 2017).

El cultivo de chile habanero requiere una fertilización química considerable para incrementar significativamente su producción, de tal forma que una deficiencia nutrimental se relaciona con pérdidas significativas (López-Gómez *et al.*, 2017; 2020). Fórmulas de NPK (Nitrógeno, Fósforo y Potasio) con 350-250-360 incrementan el número de frutos por planta, la longitud de fruto, el diámetro de fruto y el rendimiento de frutos por planta, obteniéndose un

rendimiento promedio de 41,259 kg ha⁻¹. Además, es posible que con dosis más elevadas a las recomendadas se incremente la producción de frutos por plantas (Castillo-Aguilar *et al.*, 2024). De acuerdo con esto, los agricultores suelen aumentar las dosis y uso de los fertilizantes sintéticos, lo que en muchas ocasiones es inútil, ya que una cantidad considerable del fertilizante se fuga al ambiente por lixiviación, contaminando cuerpos de agua y suelo (da Silva *et al.*, 2020; Galindo *et al.*, 2020). Por otro lado, el uso excesivo de fertilizante no siempre genera un aumento en el rendimiento; a menudo puede provocar una disminución en la absorción y uso de los nutrientes por parte de la planta, afectando así el rendimiento y las ganancias de los agricultores (Ronga *et al.*, 2019; Mendoza-Elos *et al.*, 2020; Ottaiano *et al.*, 2021). De tal manera que en la producción de chile habanero deben utilizarse estrategias biológicas o ecológicas que reduzcan el uso de fertilizantes químicos, pero que al mismo tiempo incrementen la eficiencia de los nutrientes, el rendimiento y la calidad del cultivo, con la finalidad de generar una producción sostenible. El uso de bioestimulantes microbianos es una de las estrategias que ha dado resultados favorables en el manejo de cultivos de bajos insumos o tasas reducidas de fertilizante sintético, con un enfoque de agricultura sostenible (Shahrajabian *et al.*, 2021; Sánchez-Sánchez *et al.*, 2022; Chafai *et al.*, 2023).

Los bioestimulantes microbianos son productos formulados con microorganismos benéficos, tales como hongos y bacterias que promueven el crecimiento vegetal a través de la solubilización de minerales y fijación de nitrógeno, así como de mecanismos genéticos y fisiológicos que estimulan la producción de fitohormonas, enzimas, lipopolisacáridos y compuestos orgánicos (Caulier *et al.*, 2019; Lephatsi *et al.*, 2021). También mejoran la tolerancia al estrés biótico y abiótico al activar genes del sistema de defensa de la planta y producir fenólicos, enzimas, aminoácidos y ácidos orgánicos (Backer *et al.*, 2018; Vocciante *et al.*, 2022).

Los hongos del género *Trichoderma* como bioestimulantes vegetales incrementan la altura, el diámetro del tallo, la biomasa aérea y el volumen radicular de plantas de chile habanero; así como el rendimiento, el número y peso de frutos (Cristóbal-Alejo *et al.*, 2021). Asimismo, formulaciones de bacterias del género *Bacillus* aumentan el desarrollo de plántulas, el peso y dimensiones de frutos (Adame-García *et al.*, 2021; Mejía-Bautista *et al.*, 2022). Los microorganismos que formulan los bioestimulantes vegetales poseen una variedad de efectos sobre las plantas; no obstante, una de las propiedades más importantes que se busca de estos, es el de conservar la calidad y producción de los vegetales con un manejo de bajos insumos (Sánchez-Sánchez *et al.*, 2022), meta que persigue una agricultura sostenible. Por consiguiente, el trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de un bioestimulante microbiano en las dimensiones y peso de frutos de chile habanero y su producción bajo tasas reducidas de fertilización química.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el municipio de Úrsulo Galván, Veracruz, México, en el Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván (19°24'43.64" latitud Norte y 96°21'32.42" longitud Oeste, 13 msnm), perteneciente al Tecnológico Nacional de México. Durante los meses mayo-diciembre 2024. El trabajo se llevó a cabo en condiciones protegidas de un macrotúnel con dimensiones de 3 x 30 m (90 m²). Se utilizó riego por goteo y acolchado blanco. El promedio de temperatura y humedad relativa dentro del macrotúnel fue de 28.7 °C y 74.0 % respectivamente.

Para la producción de plántulas se sembraron semillas de chile habanero rojo de la variedad Elite WS-4432 de Westar® en charolas de polietileno. Las plántulas se trasplantaron a los 35 días después de la siembra en un suelo con las siguientes características: pH 6.83, CE 82.2 µS, DAP 1.3 g/mL, Arena 31.64 %, Limo 31.16 %, Arcilla 37.98 %, M.O. 2.12 %, K 0.17 Cmol/Kg, Ca 12.03 Cmol/Kg, Mg 3.81 Cmol/Kg, N 0.11 % y P 11.3 mg/L.

Se empleó un esquema de fertilización química convencional con una formulación NPK de 100-75-110, aplicada en tres niveles (100 %, 75 % y 50 %), con y sin la incorporación de bioestimulante. El tratamiento con el 100 % de las dosis de fertilización sin bioestimulante se utilizó como control o testigo. Los tratamientos evaluados fueron cinco: T1) química 100 % (FQ100); T2) química 75 % + bioestimulante (FQ75+B); T3) química 50 % + bioestimulante (FQ50+B); T4) química 75 % (FQ75) y T5) química 50 % (FQ50). Los tratamientos se aplicaron en drench (50 mL por planta) cada 30 días.

En los tratamientos con aplicaciones del bioestimulante a base de una combinación de bacterias (*Bacillus subtilis* FDMC1, *Stenotrophomonas* sp. JAG2, *Bacillus wiedmannii* JAG3, *Priestia megaterium* JAFV4, y *P. megaterium* AERM5), se aplicó cada mes directo al suelo, a una dosis del 20 % (v/v) a una concentración de 10⁶ UFC mL⁻¹ de cada cepa.

En todos los tratamientos por igual se realizaron aplicaciones de micronutrientes con productos comerciales (N 13 %, P₂O₅ 9 %, K₂O 12 %, Ca 0.17 %, Cu 0.05 %, Co 0.01 %, B 0.07 %, S 0.04 %, Fe 0.08 %, Mn 0.5 %, Mg 0.18 %, Mo 0.03 %, Zn 0.20 %, diluyentes y acondicionadores 64.31 %) cada 20 días vía foliar. Al inicio de la floración y posteriormente cada 20 días se realizaron aplicaciones vía foliar de calcio y boro con un producto comercial (Ca 9 %, B 2 %, Zn 4 % diluyentes y acondicionadores 85 %). También se realizaron aplicaciones al suelo de ácidos húmicos (ácidos húmicos 12 % y fúlvicos 12 %), inicialmente una aplicación a los 15 días después del trasplante (ddt) y posteriormente cada 30 días, se continuó hasta concluir el ciclo productivo.

Se empleó un diseño experimental de bloques completos al azar, en el cual los cinco tratamientos se distribuyeron aleatoriamente en cuatro bloques, cada uno con dimensiones de 15 m de largo por 1 m de ancho. El arreglo de plantación correspondió a un sistema a tres bolillos, con una densidad de una planta cada 25 cm, lo que resultó en un total de 240 plantas por macrotúnel.

Cada tratamiento contó con cuatro repeticiones (bloques), y se evaluaron 40 unidades experimentales por tratamiento para la caracterización de frutos, y nueve unidades para la determinación de la producción por planta. Cada tratamiento estuvo conformado por 10 plantas, de las cuales se recolectaron frutos en dos momentos productivos (120 y 135 días después del trasplante, ddt). A partir de las seis plantas centrales de cada parcela se seleccionaron aleatoriamente 20 frutos para registrar peso y dimensiones. Así mismo, se recolectaron todos los frutos producidos por esas plantas para determinar la producción por planta para cada tratamiento.

Las variables de respuesta fueron peso (g), diámetro ecuatorial y polar (mm). Además de la producción de macrotúnel en peso (g) del total de frutos por planta por tratamiento. La significancia de las diferencias entre tratamientos se evaluó mediante un análisis de varianza (ANOVA). En los casos en que se identificaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$), se empleó una prueba de comparación de medias de Tukey. Los análisis estadísticos se realizaron con el software InfoStat versión 2020.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La reducción de la fertilización química afectó el peso y tamaño de los frutos de chile habanero rojo en los dos cortes productivos. Sin embargo, al complementar esta reducción con el bioestimulante microbiano, dichas variables mejoraron significativamente. Asimismo, la combinación del 50 % de fertilización con bioestimulante generó frutos comparables a los del tratamiento con 75 % de fertilización sin bioestimulante. Los frutos obtenidos con el 75 % de fertilización más bioestimulante fueron estadísticamente equivalentes a los obtenidos con el 100 % de fertilización (Figura 1 y 2, Tabla 1).

En el primer corte, las combinaciones de fertilización reducida con bioestimulante incrementaron el peso promedio de los frutos en un 10.7 % y 12.7 % para los tratamientos con 50 % y 75 % de fertilización, respectivamente. Además, el tratamiento con 75 % de fertilización más bioestimulante aumentó el diámetro polar en un 5.2 %.

En lo que respecta al segundo corte, las aplicaciones del bioestimulante en combinación con el 50 % y 75 % de fertilizante incrementaron el peso promedio de los frutos en un 9.6 % y 13.4 % respectivamente. De igual forma provocaron un aumento en el diámetro polar hasta de un 8.0 %, así como el diámetro ecuatorial hasta en un 6.0 %.

Al promediar los dos cortes de frutos, se mantuvo la calidad (peso y dimensiones) aun con la tasa reducida

de fertilización al 75 % complementada con la aplicación del bioestimulante, se obtuvieron frutos estadísticamente iguales a los obtenidos con el 100 % de fertilización química. En contraste, la reducción en la fertilización sin bioestimulante afectó negativamente el tamaño y peso de los frutos. Se observaron diferencias entre los tratamientos con la aplicación del bioestimulante, se aumentó el peso del fruto hasta en un 13.1 % con fertilización al 75 % y en un 10 % con el 50 % de fertilización. Asimismo, se registró un aumento en el diámetro polar del 6 % y en el ecuatorial del 5 % (Tabla 2).

Dichos incrementos resultaron inferiores a los reportados en otros trabajos con diferentes cepas bacterianas y variedades de chiles, pero utilizando la misma fertilización. Por ejemplo, Murillo-Cuevas *et al.* (2021) reportaron incrementos en el peso, diámetro polar y ecuatorial de fruto de 17.1, 12.4 y 7.8 % respectivamente en la variedad Jaguar, utilizando un pool de cepas de bacterias del género *Bacillus*. Posteriormente cuando este pool se evaluó de manera individual por cepa en la misma variedad de chile habanero, los incrementos de peso de fruto mejoraron al utilizar algunas cepas por separado, obteniéndose incrementos que superaron el 50 % con las cepas *Bacillus* EAV2, JAG3 y VVM1 (Adame-García *et al.*, 2021). Además, Mejía-Bautista *et al.* (2022) indicaron que la cepa de *Bacillus* CBMT51 incrementó el peso de fruto de chile habanero variedad naranjo criollo un 37 %, pero el diámetro polar sólo un 2 % y el ecuatorial 4.6 %, diámetros iguales y/o inferiores a los obtenidos en este trabajo.

Tabla 1. Efecto de tasas reducidas de fertilización química con y sin bioestimulante microbiano en el peso y dimensiones de fruto de chile habanero rojo en dos cortes de frutos producidos en condiciones protegidas de macrotúnel.

Tratamientos	Peso (g)	Diámetro polar (mm)	Diámetro ecuatorial (mm)
Corte 1			
FQ100	7.91 ± 0.18 ^a	41.40 ± 0.49 ^a	28.40 ± 0.32 ^a
FQ75+B	7.86 ± 0.18 ^a	40.15 ± 0.48 ^a	27.96 ± 0.32 ^{ab}
FQ50+B	6.76 ± 0.19 ^b	37.70 ± 0.49 ^{bc}	27.12 ± 0.32 ^{bc}
FQ75	6.86 ± 0.18 ^b	38.08 ± 0.49 ^b	27.06 ± 0.33 ^{bc}
FQ50	6.04 ± 0.17 ^c	36.14 ± 0.48 ^c	25.91 ± 0.33 ^c
C.V. (%)	22.28	11.38	10.45
Corte 2			
FQ100	10.40 ± 0.19 ^a	45.40 ± 0.62 ^{ab}	31.07 ± 0.42 ^a
FQ75+B	10.50 ± 0.19 ^a	46.98 ± 0.62 ^a	31.19 ± 0.42 ^a
FQ50+B	8.75 ± 0.19 ^b	42.85 ± 0.62 ^c	29.45 ± 0.43 ^b
FQ75	9.10 ± 0.19 ^b	43.17 ± 0.62 ^{bc}	29.35 ± 0.43 ^b
FQ50	7.91 ± 0.19 ^c	39.57 ± 0.62 ^d	27.44 ± 0.42 ^c
C.V. (%)	17.75	12.75	12.53

FQ100= química 100 % ; FQ75+B= química 75 % + Bioestimulante; FQ50+B= química 50 % + Bioestimulante; FQ75= química 75 % ; FQ50= química 50 % . C.V.= Coeficiente de variación. Los datos se presentan en $\bar{X} \pm E.E.$ Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

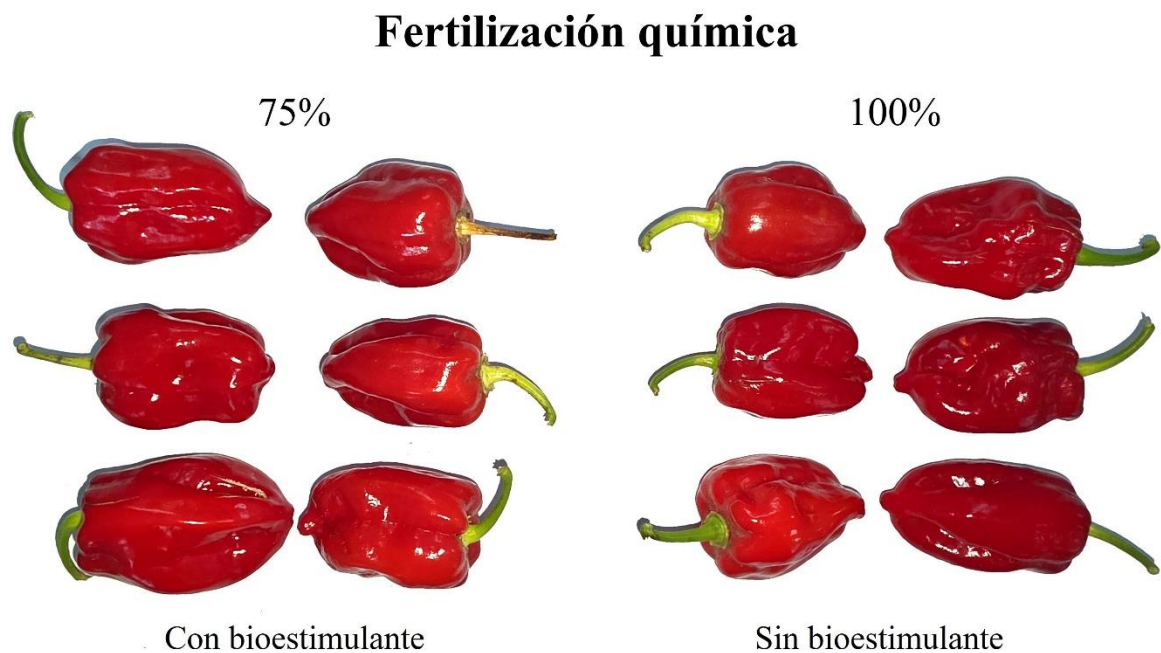


Figura 1. Muestra de frutos producidos de plantas con fertilización química al 75 % con bioestimulante y al 100 % sin bioestimulante.

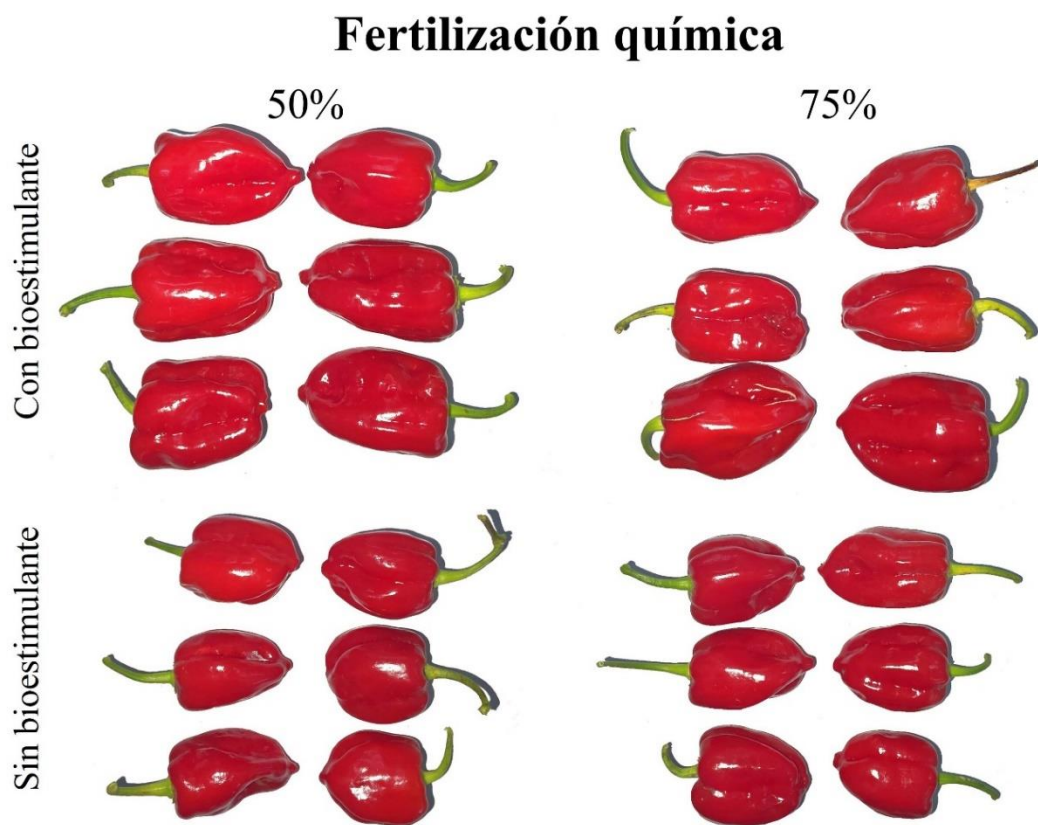


Figura 2. Muestra de frutos producidos de plantas con tasas reducidas del 50 y 75 % de fertilización química con y sin aplicaciones del bioestimulante microbiano.

Tabla 2. Efecto promedio de tasas reducidas de fertilización química con y sin bioestimulante microbiano en el peso y dimensiones de fruto de chile habanero rojo juntando dos cortes de frutos producidos en condiciones protegidas de macrotúnel.

Tratamientos	Peso de fruto (g)	Diámetro de fruto	
		Polar (mm)	Ecuatorial (mm)
FQ100	9.16 ± 0.16 ^a	43.40 ± 0.44 ^a	29.74 ± 0.20 ^a
FQ75+B	9.18 ± 0.15 ^a	43.57 ± 0.44 ^a	29.57 ± 0.20 ^a
FQ50+B	7.76 ± 0.16 ^b	40.28 ± 0.44 ^b	28.29 ± 0.21 ^b
FQ75	7.98 ± 0.15 ^b	40.62 ± 0.43 ^b	28.20 ± 0.21 ^b
FQ50	6.98 ± 0.16 ^c	37.86 ± 0.44 ^c	26.68 ± 0.20 ^c
C.V. (%)	24.03	13.61	12.39

FQ100= química 100 % ; FQ75+B= química 75 % + Bioestimulante; FQ50+B= química 50 % + Bioestimulante; FQ75= química 75 % ; FQ50= química 50 % . C.V.= Coeficiente de variación. Los datos se presentan en $\bar{X} \pm E.E.$ Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Por otro lado, los resultados encontrados en esta investigación superan en 1.3 % de incremento en el peso de fruto de chile xcat'ik con respecto a lo reportado por Gamboa-Angulo *et al.* (2020) quienes aplicaron un bioestimulante formulado con *B. subtilis* y en un 7.4 % en el peso, 3.8 % diámetro polar y 4.5 % diámetro ecuatorial de frutos de chile habanero cultivar criollo H224 al utilizar inoculaciones de *Pseudomonas* spp. (Reyes-Ramírez *et al.*, 2014). En cuanto a los efectos de los bioestimulantes microbianos en bajas dosis de fertilización, se ha reportado que un bioestimulante comercial formulado con *Azospirillum brasilense*, *P. fluorescens*, *B. megaterium* y *B. circulans*, logró incrementar el número de frutos en cuatro y ocho en las variedades de chile Cabañeros y BGV13004 respectivamente con dosis de fertilización al 50 % (Sánchez-Sánchez *et al.*, 2022).

La producción por planta de chile habanero se vio afectada negativamente por la reducción en las tasas de fertilización química cuando no aplicó el bioestimulante microbiano. Sin embargo, con una fertilización al 75 % complementada con el bioestimulante, la producción se mantuvo en ambos cortes, sin diferencias estadísticas respecto al

tratamiento con 100 % de fertilización. En términos acumulados, la combinación del bioestimulante con el 75 % y 50 % de fertilización incrementó la producción por planta en un 26 % y 36.5 % respectivamente, en comparación con los mismos niveles sin bioestimulante. Estos incrementos superan los reportados en chile xcat'ik (4.9 %) con aplicaciones de *B. subtilis* (Gamboa-Angulo *et al.*, 2020) y en chile habanero criollo H224 (24.6 %) con *Pseudomonas* spp. (Reyes-Ramírez *et al.*, 2014), ambos en comparación con el testigo sin inoculación, pero con igual fertilización. Los resultados obtenidos con el 50 % de fertilización superan el incremento de 32 % reportado por Sánchez-Sánchez *et al.* (2022) en chile variedad BGV13004, utilizando un bioestimulante comercial compuesto por *A. brasilense*, *P. fluorescens*, *B. megaterium* y *B. circulans*.

Las dosis de fertilización NPK influyen directamente en los parámetros morfológicos y productivos del chile habanero (López-Gómez *et al.*, 2017; 2020). Los resultados de este estudio muestran que, en ausencia de un complemento nutricional eficiente, como el bioestimulante, las bajas tasas de fertilización química afectan negativamente el desarrollo del fruto y la

Tabla 3. Efecto de tasas reducidas de fertilización química con y sin bioestimulante microbiano en la producción por planta de chile habanero rojo producido en condiciones protegidas de macrotúnel.

Tratamientos	Producción (g) por planta por corte		Total (g)
	1	2	
FQ100	128.39 ± 7.5 ^a	97.19 ± 5.5 ^a	112.79 ± 4.8 ^a
FQ75+B	122.08 ± 7.4 ^a	97.89 ± 5.4 ^a	109.99 ± 4.7 ^a
FQ50+B	89.53 ± 7.4 ^b	75.67 ± 5.4 ^b	82.60 ± 4.7 ^b
FQ75	87.92 ± 7.4 ^{bc}	74.83 ± 5.4 ^b	81.38 ± 4.7 ^b
FQ50	59.44 ± 7.4 ^c	45.50 ± 5.5 ^c	52.47 ± 4.8 ^c
C.V. (%)	45.89	42.38	46.04

FQ100= química 100 % ; FQ75+B= química 75 % + Bioestimulante; FQ50+B= química 50 % + Bioestimulante; FQ75= química 75 % ; FQ50= química 50 % . C.V.= Coeficiente de variación. Los datos se presentan en $\bar{X} \pm E.E.$ Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

productividad del cultivo. Al proyectar la producción por planta, una disminución del 25 % en la fertilización sin el uso del bioestimulante reduce el rendimiento en un 27 % ($\approx 16.28 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) en comparación con el tratamiento con el 100 % de fertilización ($\approx 22.56 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$). Sin embargo, con la aplicación del bioestimulante, esta reducción se atenúa de forma significativa a solo 2.48 % ($\approx 22.0 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$). De manera similar, una disminución del 50 % en la fertilización química sin bioestimulante conlleva a una pérdida del 50 % en la producción ($\approx 10.49 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$), mientras que, al incorporar el bioestimulante, la merma se reduce al 27 % ($\approx 16.52 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$), evidenciando su efecto compensatorio incluso con la mitad de la dosis de fertilización convencional.

Los resultados obtenidos en este estudio confirman la eficacia del bioestimulante microbiano en la mejora del desarrollo de los frutos de chile habanero rojo bajo condiciones de producción protegida y con tasas reducidas de fertilización química. Esto sugiere que las cepas bacterianas presentes en la formulación del bioestimulante poseen la capacidad de inducir respuestas genéticas, bioquímicas y/o fisiológicas en la planta, favoreciendo el crecimiento y desarrollo del fruto. Las cepas bacterianas que formulan el bioestimulante evaluado en este trabajo han sido identificadas a nivel molecular como *B. subtilis* FDMC1, *Stenotrophomonas* sp. JAG2, *B. wiedmannii* JAG3, *Priestia megaterium* JAFV4, y *P. megaterium* AERM5, las cuales no se han evaluado por separado. Sin embargo, *B. subtilis* ha sido clasificada dentro de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV), esta mejora la disponibilidad de nutrientes, altera la homeostasis de las fitohormonas y activa la resistencia sistémica inducida en las plantas (Blake *et al.*, 2021).

Las bacterias del género *Stenotrophomonas* utilizan diversos mecanismos para promover el crecimiento y desarrollo de las plantas, tales como la fijación de nitrógeno, la solubilización de fósforo y la síntesis de fitohormonas (Kumar *et al.*, 2023). La rizobacteria *B. wiedmannii* es muy eficiente, la cual es capaz de solubilizar fósforo inorgánico, fijar nitrógeno atmosférico y producir fitohormonas (Torres *et al.*, 2024). Por último, *P. megaterium* estimula el crecimiento de las plantas y la tolerancia al estrés abiótico por salinidad (Shi *et al.*, 2023), además tiene capacidades de desnitrificación y solubilización de fosfato (Jo *et al.*, 2023; Thakur *et al.*, 2024). Por lo tanto, la eficiencia del bioestimulante microbiano para compensar la reducción de los niveles de fertilización (75 % y 50 %) en el cultivo de chile habanero podría atribuirse a la compatibilidad entre las cepas microbianas y la planta hospedera. El éxito de los bioestimulantes microbianos depende, en gran medida, de la compatibilidad fisiológica y bioquímica que se establece en la interacción microorganismo-planta (Bulgari *et al.*, 2019; Blake *et al.*, 2021).

CONCLUSIONES

Las tasas reducidas de fertilización química, sin aplicaciones del bioestimulante, afectaron significativamente el rendimiento y calidad de los frutos de chile habanero rojo, producidos en condiciones protegidas de macrotúnel.

Con las aplicaciones del bioestimulante microbiano se obtiene un ahorro del 25 % en la fertilización química, se logra una producción y calidad de frutos de chile habanero igual a la alcanzada con un 100 % de la fertilización.

Las aplicaciones del bioestimulante con tasas reducidas de fertilización al 50 y 75 % en chile habanero rojo, incrementaron significativamente la producción y dimensiones de los frutos en comparación a lo obtenido sin aplicaciones.

Funding. Tecnológico Nacional de México - Project 19569.24-P

Conflict of interest. Nothing to declare.

Compliance of ethical standards. Not applicable

Data availability. With Félix David Murillo-Cuevas upon reasonable request.

Author contribution statement (CRediT). **J. Adame-García** – Conceptualization, Writing – review and editing, **F.D. Murillo-Cuevas** – Writing – original draft, **J.A. Fernández-Viveros** – Investigation, **A.E. Rivera-Meza** – Project administration, **H. Cabrera-Mireles** – Supervision.

REFERENCES

- Adame-García, J., Murillo-Cuevas, F. D., Velázquez-Mendoza, V., López-Vázquez, M., Antonio-Vázquez, E., Cabrera Mireles, H. y Villegas Narváez, J. 2021. Identificación molecular y evaluación de bacterias en el desarrollo vegetativo y producción de chile habanero. *Biotechnia*, 23(3), pp.151-157. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v23i3.1480>
- Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian S. and Smith, D. L. 2018. Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in plant science*, 9, pp.1-17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>

- Blake, C., Christensen, M. N., and Kovács, Á. T. 2021. Molecular aspects of plant growth promotion and protection by *Bacillus subtilis*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 34(1), pp.15-25. <https://doi.org/10.1094/MPMI-08-20-0225-CR>
- Bulgari, R., Franzoni, G., & Ferrante, A. 2019. Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions. *Agronomy*, 9(6), pp. 1-30. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060306>
- Castillo-Aguilar, C., Ramírez-Luna, E., Wong-Cámara, C. G., Matos-Pech, G., Chiquini-Medina, R. A., Bautista-Parra, S. G. y Palma-Cancino, D. J. 2024. Rendimiento de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) con el uso de diferentes niveles de NPK en Campeche, México. *Revista Bio Ciencias*, 11, pp.1-12. <https://doi.org/10.15741/revbio.11.e1581>
- Caulier, S., Nannan, C., Gillis, A., Licciardi, F., Bragard, C., & Mahillon, J. 2019. Overview of the antimicrobial compounds produced by members of the *Bacillus subtilis* group. *Frontiers in microbiology*, 10, 302, pp.1-19. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00302>
- Cedillo-Portugal, E. 2018. Implicaciones socioeconómicas por la implementación de programas de sanidad, calidad e inocuidad alimentaria en el sector productivo de frutas y hortalizas en México. *Agro Productividad*, 11(2), pp.140-146.
- Chafai, W., Haddioui, K., Serghini-Caid, H., Labazi, H., AlZain, M. N., Noman, O., Parvez, M. K. Addi, M. and Khalid, A. 2023. Impact of Arbuscular mycorrhizal fungal strains isolated from soil on the growth, yield, and fruit quality of tomato plants under different fertilization regimens. *Horticulturae*, 9(9), pp.1-18. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9090973>
- Cotler, H., Corona, J. A. y Galeana-Pizaña, J. M. 2020. Erosión de suelos y carencia alimentaria en México: una primera aproximación. *Investigaciones geográficas*, 101, pp.1-14. <https://doi.org/10.14350/ig.59976>
- Cristóbal-Alejo, J., Moo-Koh, F. A., Tun-Suárez, J. M., Reyes-Ramírez A. y Gamboa-Angulo, M. 2021. Efecto de la interacción dual de especies de *Trichoderma* en el crecimiento de *Capsicum chinense* Jacq. *Agrociencia*, 55(8), pp.681-693. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i8.2661>
- da Silva, J. M., Fontes, P. C. R., Milagres, C. D. C., and de Abreu, J. A. A. 2020. Yield and nitrogen use efficiency of bell pepper grown in SLAB fertigated with different nitrogen rates. *Journal of Plant Nutrition*, 43(18), pp.2833-2843. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1783297>
- Estrada-Herrera, I. R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz Suárez, J. J., Navarro-Garza, H. y Etchevers-Barra, J. D. 2017. Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51(8), pp.813-831.
- Galindo, L. A. G., Rivas, A. C., Melendez, J. P. y Mayorquín, N. 2020. Alternativas microbiológicas para la remediación de suelos y aguas contaminados con fertilizantes nitrogenados. *Scientia et technica*, 25(1), pp.172-183.
- Gamboa-Angulo, J., Ruíz-Sánchez, E., Alvarado-López, C., Gutiérrez-Miceli, F., Ruíz-Valdiviezo, V. M. y Medina-Dzul, K. 2020. Efecto de biofertilizantes microbianos en las características agronómicas de la planta y calidad del fruto del chile xcat'ik (*Capsicum annuum* L.). *Terra Latinoamericana*, 38, 817-826. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.716>
- Guerrero, V. T. and Guevara, F. C. 2021. Influence of deforestation and environmental degradation on agriculture in Mexico. *Journal of Agriculture & Environmental Sciences*, 5(1), pp.27-37.
- FIRCO. 2017. Fideicomiso de Riesgo Compartido. Chile habanero, con denominación de origen [Blog gubernamental]. <https://www.gob.mx/firco/articulos/chile-habanero-con-denominacion-de-origen?idiom=es>
- Jo, H., Lim, K., Ibal, J. C., Kim, M. C., Kim, H. B., Baek, C., ... and Shin, J. H. 2023. Growth increase in the herbaceous plant *Centella asiatica* by the plant growth-promoting rhizobacteria *Priestia megaterium* HyangYak-01. *Plants*, 12(13), pp.2398. <https://doi.org/10.3390/plants12132398>
- Kumar, A., Rithesh, L., Kumar, V., Raghuvanshi, N., Chaudhary, K., Abhineet and Pandey, A. K. 2023. *Stenotrophomonas* in diversified cropping systems: friend or foe?. *Frontiers in*

- Microbiology*, 14, pp.1-16.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1214680>
- Lephatsi, M. M., Meyer, V., Piater, L. A., Dubery, I. A. and Tugizimana, F. 2021. Plant responses to abiotic stresses and rhizobacterial biostimulants: Metabolomics and epigenetics perspectives. *Metabolites*, 11(7), pp.1-31.
<https://doi.org/10.3390/metabo11070457>
- López-Gómez, J. D., Sotelo Nava, H., Villegas-Torres, O. G. and Andrade Rodríguez, M. 2020. Yield and quality of habanero chili in response to driving pruning and nutritional regime. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(2), pp.315-325.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v11i2.1777>
- López-Gómez, J. D., Villegas-Torres, O. G., Sotelo Nava, H., Andrade Rodríguez, M., Juárez López, P. y Martínez Fernández, E. 2017. Rendimiento y calidad del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) por efecto del régimen nutrimental. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(8), pp.1747-1758.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v8i8.699>
- Mejía-Bautista, M. Á., Cristóbal-Alejo, J., Pacheco-Aguilar, J. R. y Reyes-Ramírez, A. 2022. *Bacillus* spp. on the growth and yield of *Capsicum chinense* Jacq. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(1), pp.115-126.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v13i1.2664>
- Mendoza-Elos, M., Zamudio Alvarez, L. F., Cervantes Ortiz, F., Chable Moreno, F., Frias Pizano, J. y Gámez Vázquez, A. J. 2020. Rendimiento de semilla y calidad de fruto de chile habanero con fertilización química y orgánica. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(8), pp.1749-1761.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v11i8.1960>
- Murillo-Cuevas, F. D., Cabrera-Mireles, H., Adame-García, J., Vásquez-Hernández, A., Martínez-García, A. D. J. y Moctezuma, R. L. 2021. Bioestimulantes en la calidad de frutos de chile habanero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(8), pp.1473-1481.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v12i8.2900>
- Ottaiano, L., Di Mola, I., Cozzolino, E., El-Nakhel, C., Roupahel, Y., & Mori, M. (2021). Biostimulant application under different nitrogen fertilization levels: Assessment of yield, leaf quality, and nitrogen metabolism of tunnel-grown lettuce. *Agronomy*, 11(8), pp.1-13.
<https://doi.org/10.3390/agronomy11081613>
- Reyes-Ramírez, A., López-Arcos, M., Ruiz-Sánchez, E., Latournerie-Moreno, L., Pérez-Gutiérrez, A., Lozano-Contreras, M. G. y Zavala-León, M. J. 2014. Efectividad de inoculantes microbianos en el crecimiento y productividad de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Agrociencia*, 48(3), pp.285-294.
- Ronga, D., Parisi, M., Pentangelo, A., Mori, M. and Di Mola, I. 2019. Effects of nitrogen management on biomass production and dry matter distribution of processing tomato cropped in southern Italy. *Agronomy*, 9(12), 1-16.
<https://doi.org/10.3390/agronomy9120855>
- Sánchez-Sánchez, A., Hernández, V., Hellín, P., Jiménez-Pérez, M., Rodríguez-Burruezo, A., Fenoll, J. and Flores, P. 2022. Impact of low-input management and microbial biostimulants on yields of traditional pepper varieties. *AgroLife Scientific Journal*, 11(1), pp.196-203.
<https://doi.org/10.17930/AGL2022123>
- Shahrajabian, M. H., Chaski, C., Polyzos, N. and Petropoulos, S. A. 2021. Biostimulants application: A low input cropping management tool for sustainable farming of vegetables. *Biomolecules*, 11(5), pp.1-53.
<https://doi.org/10.3390/biom11050698>
- Shi, L., Zhu, X., Qian, T., Du, J., Du, Y. and Ye, J. 2023. Mechanism of Salt Tolerance and Plant Growth Promotion in *Priestia megaterium* ZS-3 Revealed by Cellular Metabolism and Whole-Genome Studies. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(21), pp.1-18. <https://doi.org/10.3390/ijms242115751>
- SIAP. (2023). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Cierre de la producción agrícola. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Resumen nacional por cultivo y variedad. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Thakur, R., Dhar, H., Swarnkar, M. K., Soni, R., Sharma, K. C., Singh, A. K., ... and Gulati, A. 2024. Understanding the Molecular Mechanism of PGPR Strain *Priestia megaterium* from Tea Rhizosphere for Stress Alleviation and Crop Growth Enhancement. *Plant Stress*, 12, 100494.
<https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100494>

- Torres, P., Altier, N., Beyhaut, E., Fresia, P., Garaycochea, S. and Abreo, E. 2024. Phenotypic, genomic and in planta characterization of *Bacillus sensu lato* for their phosphorus biofertilization and plant growth promotion features in soybean. *Microbiological Research*, 280, pp.127566. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127566>
- Voccianti, M., Grifoni, M., Fusini, D., Petruzzelli, G. and Franchi, E. 2022. The role of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) in mitigating plant's environmental stresses. *Applied Sciences*, 12(3), 1231, pp.1-16. <https://doi.org/10.3390/app12031231>