

Producción de chile jalapeño en mini-túnel en respuesta a la fertilización sintética, orgánica y carbónica

Production of jalapeño pepper in mini-tunnel in response to synthetic, organic and carbon fertilization

Olivia Vanessa Encines-Chaidez¹ ,
Felipe Ayala-Tafoya^{2*} ,
Juan Martín Parra-Delgado² ,
Marino Valenzuela-López² ,
Guadalupe Alfonso López-Urquidez² ,
Moisés Gilberto Yáñez-Juárez² 

¹Doctorado en Ciencias Agropecuarias-Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia-Universidad Autónoma de Sinaloa. Boulevard San Ángel S/N, Fraccionamiento San Benito, Predio Las Coloradas, CP. 80246. Culiacán, Sinaloa, México.

²Facultad de Agronomía-Universidad Autónoma de Sinaloa. Carretera Culiacán-Eldorado km 17.5, Apartado Postal 25, CP. 80000. Culiacán Rosales, Sinaloa. México.

*Autor de correspondencia: tafoya@uas.edu.mx

Artículo científico

Recibido: 07 de julio 2022

Aceptado: 14 de septiembre 2022

Como citar: Encines-Chaidez OV, Ayala-Tafoya F, Parra-Delgado JM, Valenzuela-López M, López-Urquidez GA, Yáñez-Juárez MG (2022) Producción de chile jalapeño en mini-túnel en respuesta a la fertilización sintética, orgánica y carbónica. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 9(3): e3412. DOI: 10.19136/era.a9n3.3412

RESUMEN. El uso de abonos orgánicos en sistemas de fertilización integrada es una alternativa para la recuperación de la fertilidad de los suelos y elevar la productividad de los cultivos. El objetivo fue determinar la contribución de fertilizantes sintéticos y orgánicos, así como del CO₂ producido durante el compostaje, en el crecimiento de las plantas y el rendimiento de chile jalapeño cultivado en mini-túnel. Se usó un diseño de bloques al azar con ocho tratamientos y tres repeticiones. Las variables evaluadas fueron: concentración de CO₂ en el aire interno del mini-túnel; altura de planta; diámetro de tallo; verdor foliar; peso seco de raíces, tallos, hojas y total por planta; rendimiento de frutos, total y de calibres comerciales. Los tratamientos con fertilizantes sintéticos + lombricomposta + CO₂ de compostaje (T1), lombricomposta + CO₂ de compostaje (T5), fertilizantes sintéticos + CO₂ de compostaje (T3), y CO₂ de compostaje (T7), incrementaron la concentración de dióxido de carbono dentro de los mini-túneles en 142, 113.8, 78.9 y 66.6%, respectivamente, comparados con el testigo positivo (T4), en el cual solo se usó fertilizantes sintéticos (378.6 ppm). T1, T2 (fertilizantes sintéticos + lombricomposta) y T3, aumentaron el peso seco de planta en 51.2, 31.1 y 8.4%, y en 50, 24 y 12.1% el rendimiento total, en comparación con las mismas variables obtenidas en T4: 104.4 g planta⁻¹ y 41.2 t ha⁻¹, respectivamente. La producción de chile jalapeño mejoró significativamente con la adición de lombricomposta y/o CO₂ de compostaje a la fertilización convencional sintética.

Palabras clave: *Capsicum annuum* L., dióxido de carbono, lombricomposta, peso seco, rendimiento de frutos.

ABSTRACT. The use of organic fertilizers in integrated fertilization systems is an alternative to recover soil fertility and increase crop productivity. The objective was to determine the contribution of synthetic and organic fertilizers, as well as the CO₂ produced during composting, on plant growth and yield of jalapeño peppers grown in mini-tunnels. A randomized block design with eight treatments and three replications was used. The variables evaluated were: CO₂ concentration in the internal air of the mini-tunnel; plant height; stem diameter; leaf greenness; dry weight of roots, stems, leaves and total per plant; fruit yield, total and commercial sizes. Treatments with synthetic fertilizers + vermicompost + CO₂ from composting (T1), vermicompost + CO₂ from composting (T5), synthetic fertilizers + CO₂ from composting (T3), and CO₂ from composting (T7), increased the concentration of carbon dioxide within of the mini-tunnels in 142, 113.8, 78.9 and 66.6%, respectively, compared to the positive control (T4), in which only synthetic fertilizers (378.6 ppm) were used. T1, T2 (synthetic fertilizers + vermicompost) and T3 increased the dry weight of the plant by 51.2, 31.1 and 8.4%, and the total yield by 50, 24 and 12.1%, compared to the same variables obtained in T4: 104.4 g plant⁻¹ and 41.2 t ha⁻¹, respectively. Jalapeño pepper production was significantly improved with the addition of vermicompost and/or CO₂ from composting to conventional synthetic fertilization.

Key words: *Capsicum annuum* L., carbon dioxide, dry weight, fruits yield, vermicompost.

INTRODUCCIÓN

La tendencia en la agricultura es encontrar alternativas de cultivo que disminuyan o eliminen el uso de fertilizantes, plaguicidas y reguladores del crecimiento de origen sintético, los cuales implican un riesgo de contaminar al medioambiente, y que tengan la capacidad de mantener o incrementar el rendimiento de los cultivos (Eldridge *et al.* 2018, Kumar *et al.* 2021). En la búsqueda de alternativas de desarrollo sostenible, procesos como el compostaje y los productos derivados del mismo, han adquirido auge por su capacidad de restituir al suelo una proporción de materia orgánica para mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas, deterioradas por el uso continuo de fertilizantes sintéticos bajo producción intensiva de cultivos (Panico *et al.* 2019, Neha *et al.* 2022).

Las compostas y lombricompostas elevan la productividad de los cultivos, en virtud de contener los nutrientes esenciales para las plantas, aunque en menores concentraciones que los fertilizantes sintéticos (Abbey *et al.* 2018, Mahmud *et al.* 2018). Además, los fertilizantes orgánicos ejercen un efecto multilateral en las propiedades agronómicas del suelo, al contribuir en el mantenimiento y desarrollo de la microflora y microfauna (Zhao *et al.* 2020, Neha *et al.* 2022), que a su vez incrementa la disponibilidad y asimilación de los nutrientes por las raíces (Gomes-Júnior *et al.* 2019).

Los abonos orgánicos son ricos en hormonas que estimulan los procesos biológicos de las plantas (Ravindran *et al.* 2016, Blouin *et al.* 2019, Rékási *et al.* 2019); contienen materia orgánica, ácidos húmicos y fúlvicos que mejoran las características físico-químicas del suelo (García *et al.* 2012, Gomes-Júnior *et al.* 2019). Lo anterior, explica el uso de abonos orgánicos como una alternativa importante para la recuperación de la fertilidad de los suelos (Scotti *et al.* 2015) y sugiere enormes beneficios al establecimiento de sistemas de fertilización integral, basadas en el aprovechamiento complementario de fertilizantes sintéticos y orgánicos que garanticen la efectividad y disponibilidad inmediata de los nutrientes minerales esenciales (Bekele *et al.* 2018,

Li *et al.* 2019), además de la acción residual y el efecto mejorador sobre las propiedades físicas y biológicas de los suelos, proporcionado por los fertilizantes orgánicos (Islam *et al.* 2017, Zhao *et al.* 2017, Makkar *et al.* 2019).

Durante el proceso de compostaje, bajo la acción de diversos microorganismos y factores ambientales, los residuos orgánicos se descomponen en CO₂, agua, iones minerales y materia orgánica estabilizada, rica en sustancias húmicas (Ferraz-Ramos *et al.* 2022, Hu *et al.* 2021). En el compostaje la producción de CO₂ se encuentra directamente correlacionada con la respiración microbiana aerobia y, por lo tanto, la actividad biológica de los grupos microbianos aerobios directamente involucrados en la descomposición o degradación de la materia orgánica (Kalamdhad *et al.* 2008). Al respecto, Romero-Yam *et al.* (2015) analizaron el compostaje de sustratos de cachaza con gallinaza, y encontraron que aquellos con mayor proporción de gallinaza (7:3 y 5:5 v/v) mostraron las mayores poblaciones de bacterias, hongos y microorganismos ligninolíticos, así como mayor producción de CO₂ durante el proceso de compostaje.

Evaluaciones de la actividad biológica de suelos degradados por sales al agregarles 1.0% de lombricomposta (p/p) mostraron incrementos en la respiración edáfica de 103 a 293% con respecto al suelo sin lombricomposta (Mogollón *et al.* 2014). Mientras que Yazdanpanaha *et al.* (2016) encontraron que compostas de residuos de alfalfa y de residuos de sólidos urbanos aumentaron la respiración microbiana (producción de CO₂) de 52.4 a 196% en suelo franco arenoso y de 22.1 a 232.7% en suelo franco arcilloso, respectivamente, en comparación con el tratamiento control.

Las compostas son abonos orgánicos en plena expansión, sin embargo, el dióxido de carbono (CO₂) producido durante el proceso de compostaje es emitido hacia la atmósfera, por lo que se desconoce el beneficio que se puede obtener, si es utilizado en combinación con la fertilización sintética y orgánica, en el cultivo protegido de chile jalapeño. Por lo anterior el objetivo de este trabajo fue determinar la contribución de los fertilizantes sintéticos y orgánicos, así

como del CO₂ producido durante el compostaje, en el crecimiento de las plantas y el rendimiento de chile jalapeño cultivado en mini-túnel.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y características del sitio del experimento

La investigación se realizó durante el otoño-invierno de los ciclos agrícolas 2017-2018 y 2018-2019, en el campo experimental de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa, localizado geográficamente a 24° 37' 30" LN y 107° 26' 30" LO, a una altitud de 38.54 m. El suelo es tipo vertisol crómico con drenaje superficial regular. La capacidad de campo es de 64% y el punto de marchitamiento permanente de 39%, por lo que la humedad aprovechable es de 25% con base en el peso de suelo seco. El contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio es de 1.0, 0.003, 0.008 y 0.03%, respectivamente; pH de 7.7; y conductividad eléctrica de 1.1 dS m⁻¹. En Culiacán, Sinaloa, el clima es BS1(h')w(w)(e): semiseco muy cálido extremo con lluvias de verano, con un porcentaje de precipitación invernal con respecto al total anual menor de cinco (García 2004).

Preparación del suelo y aplicación de lombricomposta

El suelo se preparó mediante labores de barbecho y rastreo hasta lograr un buen desmenuzamiento de terrones. Después se formaron camas hortícolas con una separación de 1.8 m y se incorporó lombricomposta al suelo, en dosis de 10 t ha⁻¹, en las parcelas experimentales de los tratamientos que incluyeron lombricomposta, cuarenta días antes del trasplante. Finalmente, las camas de cultivo fueron acolchadas con polietileno de baja densidad lineal blanco/negro, después de colocar cintillas de riego por goteo.

Siembra y trasplante

La siembra de chile jalapeño cv. Mixteco fue realizada el 29 de septiembre de 2017 y el 28 de septiembre de 2018, en charolas de poliestireno de

200 cavidades con una mezcla de turba y vermiculita (3:1 v/v). La producción de plántula se llevó a cabo bajo condiciones de invernadero y manejo convencional utilizado por los agricultores. Los respectivos trasplantes se realizaron el 20 de noviembre de 2017 y el 19 de noviembre de 2018. En ambos ciclos la separación entre plantas fue de 0.33 m, a hilera doble, para una densidad de 33 673 plantas por hectárea.

Mini-túneles y compostaje

Se construyeron 24 túneles de 1.2 m de alto por 1 m de ancho. Para ello fueron utilizadas piezas de alambón (6.35 mm de diámetro), las cuales se colocaron sobre las camas de cultivo en forma de "U" invertida, separadas a 1.5 m una de otra. Para la cubierta se utilizó polietileno de baja densidad de 76 micras de espesor, reforzado con estabilizantes UV, 92/25% de transmisión/difusión de luz visible y multiperforado en bandas a cada costado del túnel, con orificios de 10 mm de diámetro. Cada túnel individual tuvo una superficie útil de 6 m de largo. En una mitad se cultivó chile jalapeño y en la superficie restante se colocaron dos contenedores (tambo de 200 L cortado por la mitad horizontalmente), cada uno con 50 L de materiales para compostaje, con alrededor de 1 m de separación de las plantas.

Para el proceso de compostaje se utilizó la siguiente proporción de materias primas: 160 kg de estiércol de bovino, 40 kg de salvado de trigo, 80 kg de alfalfa molida, 80 kg de tierra aluvial, además de 4 L de melaza y 30 g de levadura, para activar el proceso de descomposición. Cada ciclo de compostaje tuvo una duración promedio de 16.5 días, desde la mezcla *in situ* y su colocación en los contenedores hasta la estabilización de temperatura y emisión de CO₂ de la composta (Kalamdhad *et al.* 2008, Sharma *et al.* 2017), con respecto a los niveles de referencia en el aire interno de los mini-túneles sin compostaje.

Riego y fertilización

La aportación de agua y fertilizantes se hizo mediante un sistema de riego por goteo. En el área experimental con fertilización sintética se utilizó una solución nutritiva con la siguiente concen-

tración de fertilizantes: 191.2 g de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 54.5 g de KNO_3 , 47 g de K_2SO_4 , 88.6 g de MgSO_4 y 24.5 g de KH_2PO_4 , por cada 200 L de agua. Desde el trasplante hasta el inicio de cuaje de frutos se aplicó la solución nutritiva al 50% y después se utilizó completa. Los riegos, con solución nutritiva o solo con agua en el área experimental sin fertilización sintética, se realizaron cuando los tensiómetros (2725ARL, Soilmoisture) colocados a 30 cm de profundidad del suelo indicaron una tensión de humedad de 20 a 25 kPa.

Diseño experimental y tratamientos

Se utilizó un diseño de bloques al azar con arreglo factorial 2A x 2B x 2C. El factor A correspondió a la fertilización sintética (FS), la cual fue suministrada mediante el riego con solución nutritiva y riego con agua corriente. El factor B fue la fertilización orgánica provista con 10.0 y 0.0 t ha⁻¹ de lombricomposta (LC), incorporada al suelo durante la formación de las camas de cultivo. Mientras que el factor C correspondió a la fertilización carbónica, la cual fue o no abastecida con o sin el CO_2 producido por cuatro ciclos de compostaje (C) distribuidos durante el período de estudio. Los tratamientos (interacción A x B x C): fertilizantes sintéticos + lombricomposta + CO_2 de compostaje (T1 = FS+LC+C), fertilizantes sintéticos + lombricomposta (T2 = FS + LC), fertilizantes sintéticos + CO_2 de compostaje (T3 = FS + C), fertilizantes sintéticos/testigo positivo (T4 = FS/TP), lombricomposta + CO_2 de compostaje (T5 = LC + C), lombricomposta (T6 = LC), CO_2 de compostaje (T7 = C) y testigo negativo (T8 = TN), se establecieron con tres repeticiones en 796 m² de área experimental. Como parcela útil se tuvo una cama de cultivo de 6 m de largo (10.8 m²), dejando una cama a cada lado y una franja de igual longitud (1.8 m) en cada extremo para evitar el efecto borde.

Variables de respuesta

La concentración de CO_2 en el aire interno de los túneles fue determinada a las 9 am y 12 pm, tres veces por semana, a partir del primer ciclo de compostaje iniciado 15 días después del trasplante, mediante un medidor de CO_2 (CO_2 -100, Amprobe®).

Para constatar la influencia de los tratamientos en el crecimiento de las plantas, se midió en cuatro plantas por repetición: la altura de planta, desde la base del tallo hasta el ápice de crecimiento, con cinta métrica; diámetro de tallo, en el primer entrenudo, con un calibrador vernier (CALDI-6MP, Truper®). También se obtuvo el índice de verdor, en lecturas SPAD, a través de mediciones en hojas del estrato inferior, medio y superior de las plantas, mediante un medidor de clorofila (SPAD-502Plus, Konica Minolta).

La eficiencia fotosintética de las plantas se estimó a partir de la producción de materia seca de tallos, hojas y raíz de cuatro plantas por repetición, la cual se obtuvo al final de cada ciclo de cultivo. El material vegetal fue colocado en horno eléctrico (FE-292, Felisa®) a 70 °C, hasta alcanzar peso seco constante, el cual fue obtenido por medio de una balanza analítica (V12140, Ohaus®). Para determinar el rendimiento de chile jalapeño se consideró la longitud (cm), diámetro (cm) y peso (g) de los frutos, los cuales fueron clasificados en los tamaños: mediano (5.0 a 7.5 cm, 3.0 a 4.5 cm, 15.1 a 24.9 g), grande (7.6 a 9.0 cm, 3.0 a 4.5 cm, 25.0 a 35.0 g) y extragrande (> 9.0 cm, > 4.5 cm, > 35.0 g), de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-FF-025-SCFI-2014 (SE 2015).

Análisis de datos

Los datos (promedio de dos ciclos de cultivo) obtenidos para cada variable fueron sometidos al análisis de varianza y prueba de comparaciones múltiples de medias de Tukey ($p \leq 0.05$) con el software para análisis estadístico InfoStat versión 2018 (Di Rienzo et al. 2018).

RESULTADOS

Concentración de CO_2 dentro de los mini-túneles

En la Figura 1 se presenta el comportamiento del CO_2 en el aire interno de los mini-túneles, durante los cuatro ciclos de compostaje. La concentración de CO_2 en T1 (FS + LC + C) presentó valores máximos que superaron las 1 200 ppm, en T5 (LC + C) rebasaron 1 000 ppm, mientras que en T3 (FS + C)

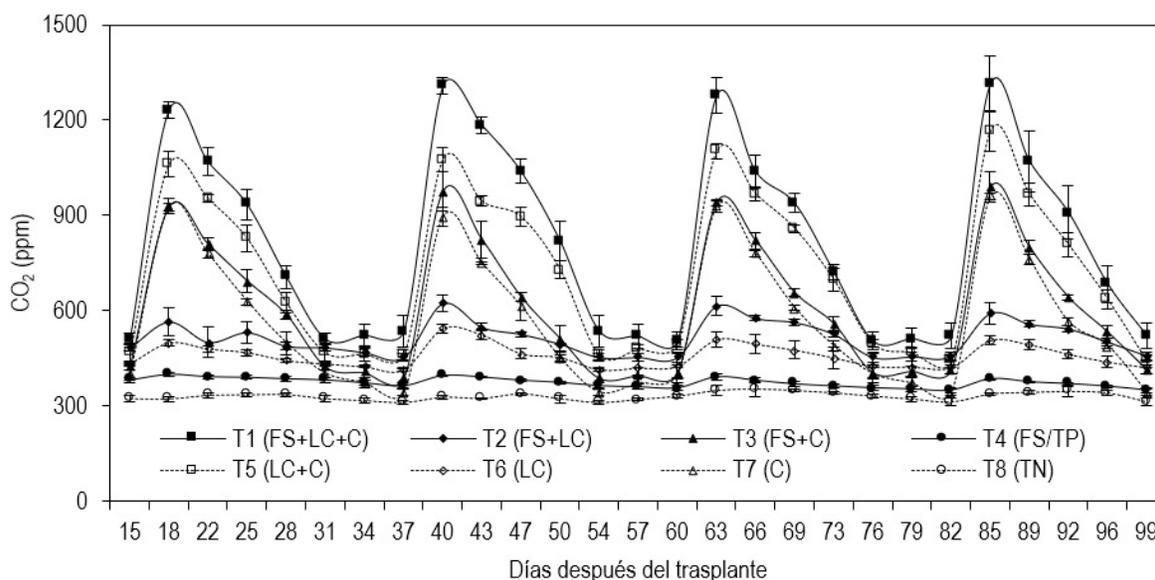


Figura 1. Influencia de fertilizantes sintéticos (FS), lombricomposta (LC) y CO₂ de compostaje (C) sobre la concentración de dióxido de carbono en el aire interno del mini-túnel. TP = testigo positivo. TN = testigo negativo. Las barras de error representan el error estándar de las medias.

y T7 (C) excedieron 800 ppm, 2 a 3 días después del inicio del compostaje. En los tratamientos mencionados, las concentraciones de 800 ppm o más se mantuvieron entre 3 y 5 días en T3 (FS + C) y T7 (C), mientras que en T1 (FS + LC + C) y T5 (LC + C) de 6 a 10 días, y superiores a 600 ppm de 10 a 13 días. Las concentraciones de CO₂ se mantuvieron elevadas, a pesar del intercambio de gases a través de las perforaciones en la cubierta de los mini-túneles. En T2 (FS + LC) y T6 (LC) el CO₂ fluctuó entre 400 y 600 ppm. En el testigo positivo (T4 = FS) y testigo negativo (T8), debido al intercambio de gases, el aire interno no presentó menos de 300 ppm de CO₂.

La concentración promedio de CO₂ en el aire interno de los túneles mostró diferencias ($p \leq 0.05$) causadas por los tratamientos (Tabla 1). Las mayores concentraciones de CO₂ fueron registradas en los tratamientos que incluyeron compostaje: T1 (FS + LC + C), T5 (LC + C), T3 (FS + C) y T7 (C), las cuales superaron en 142, 113.8, 78.9 y 66.6% a la concentración de CO₂ registrada en el testigo positivo (T4 = FS) de 378.6 ppm. Después se ubicaron dos tratamientos con lombricomposta: T2 (FS + LC) y T6 (LC), los cuales incrementaron el CO₂ en 40.2

y 24.3%, comparados con el testigo positivo. Las menores concentraciones de CO₂ en el aire interno de los mini-túneles fueron obtenidas en los testigos positivo y negativo (T8: 334.4 ppm).

Crecimiento de las plantas

El crecimiento de las plantas de chile jalapeño también manifestó diferencias ($p \leq 0.05$) ocasionadas por los tratamientos (Tabla 1). Con T1 (FS + LC + C) se indujo la mayor altura de planta (108.3 cm), la cual superó en 19.1, 12.5 y 19.1% a la alcanzada por las plantas de T2 (FS + LC), T3 (FS + C) y T4 (FS/TP), respectivamente. A su vez, las plantas del testigo positivo fueron más altas en comparación con las plantas del resto de los tratamientos, desde 16.8 (T5 = LC + C) hasta 61.7% (T8/TN).

El diámetro de tallo de las plantas de T1 (FS + LC + C), T2 (FS + LC) y T3 (FS + C) fue estadísticamente igual al de las plantas del testigo positivo (T4 = FS), cuyo valor promedio (16.7 mm) superó en 21.9% a la media de los valores observados en las plantas de T5 (LC + C) y T6 (LC) y en 53.1% al de las plantas de T7 (C) y T8 (TN).

Los valores SPAD obtenidos en las hojas de las plantas de T1 (FS + LC + C) fueron los más al-

Tabla 1. Influencia de fertilizantes sintéticos (FS), lombricomposta (LC) y CO₂ de compostaje (C) sobre la concentración de CO₂ en el aire, la altura, diámetro de tallo y verdor foliar de la planta de chile jalapeño cultivada en mini-túnel.

Tratamientos	CO ₂ (ppm)	Altura de planta (cm)	Diámetro de tallo (mm)	Verdor foliar (valores SPAD)
T1 (FS + LC + C)	916.1 ± 10.4 a*	108.3 ± 1.7 a	16.8 ± 0.3 a	61.2 ± 0.6 a
T2 (FS + LC)	530.7 ± 7.1 e	94.9 ± 1.3 b	16.7 ± 0.4 a	56.9 ± 0.7 b
T3 (FS + C)	677.5 ± 13.5 c	96.3 ± 0.3 b	17.0 ± 0.3 a	52.8 ± 0.9 c
T4 (FS/TP)	378.6 ± 3.5 g	90.9 ± 1.2 b	16.3 ± 0.1 a	51.7 ± 0.8 cd
T5 (LC + C)	809.4 ± 3.8 b	77.8 ± 0.4 c	14.0 ± 0.1 b	49.5 ± 0.3 cd
T6 (LC)	470.8 ± 7.0 f	69.1 ± 0.8 d	13.4 ± 0.4 b	48.5 ± 0.2 d
T7 (C)	630.9 ± 1.7 d	65.6 ± 1.3 d	11.0 ± 0.2 c	39.1 ± 1.3 e
T8 (TN)	334.4 ± 2.4 h	56.2 ± 1.5 e	10.8 ± 0.2 c	34.3 ± 0.3 f
DMS	35.7	5.7	1.3	3.5

TP = testigo positivo. TN = testigo negativo. DMS = diferencia mínima significativa. *Medias ± error estándar con letras iguales dentro de cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

tos (61.2) y superaron en 7.6, 16 y 18.3% al verdor foliar de las plantas de T2 (FS + LC), T3 (FS + C) y T4 (FS/TP), respectivamente. El verdor foliar de las plantas del testigo positivo (51.7) fue estadísticamente igual al de las plantas de T3, T5 (LC + C) y T6 (LC). Mientras que, con relación a las plantas sin fertilización sintética u orgánica, el índice de verdor obtenido en T7 (C) fue 13.7% superior al obtenido en las plantas del testigo negativo (T8).

Eficiencia fotosintética/producción de materia seca

Para la producción de materia seca se tuvieron diferencias (Tabla 2), ya que el peso seco de las plantas de T1 (FS + LC + C) superó en 15.3, 39.5 y 51.2% al de las plantas de T2 (FS + LC), T3 (FS + C) y T4 (FS/TP), respectivamente. A su vez, el peso seco de las plantas del testigo positivo (104.4 g planta⁻¹) rebasó al de las plantas de los demás tratamientos, desde 13.1% (T5: LC + C) hasta 96.2% (T8/TN). A la par, el peso seco de tallos de las plantas de T1 (FS + LC + C: 69.1 g planta⁻¹) superó al de las plantas de T2 (FS + LC), T3 (FS + C) y T4 (FS/TP) en 16.9, 48.9 y 58.5%, respectivamente. En la comparación del peso seco de tallos de las plantas del testigo positivo (43.6 g planta⁻¹) no se observaron diferencias con respecto a T3 (FS + C) y T5 (LC + C), pero si fue superior al de las plantas del resto de los tratamientos, desde 32.5 (T6: LC) hasta 69.6% (T8/TN). Asimismo, el peso seco de hojas de las plantas de T1 (FS + LC + C) superó en 19.5, 31.6 y 48% al de las plantas

de T2 (FS + LC), T3 (FS + C) y T4 (FS/TP). El peso seco de hojas de las plantas del testigo positivo (38.5 g planta⁻¹) fue estadísticamente igual al de T5 (LC + C) pero superior en 48.6% a T6 (LC) y en 120% al testigo negativo (T8). El peso seco de raíz de las plantas de T1 (FS + LC + C) no presentó diferencias con el de las plantas de T2 (FS + LC), pero superó en 35.7 y 43% al de las plantas de T3 (FS + C) y T4 (FS/TP), estadísticamente iguales entre sí. El peso seco de raíz de las plantas del testigo positivo (22.3 g) excedió al de las plantas de los demás tratamientos, desde 31.2 (T5: LC + C) hasta 123% (T8/TN).

Rendimiento de chile jalapeño

El rendimiento total y de tamaños comerciales de chile jalapeño presentaron diferencias ($p \leq 0.05$) ocasionadas por los tratamientos (Tabla 3). El rendimiento total con T1 (FS + LC + C), T2 (FS + LC) y T3 (FS + C) superó en 50, 24 y 12.1% al obtenido con el testigo positivo (T4 = FS: 41.2 t ha⁻¹). De la misma manera, el rendimiento de tamaño extragrande de T1 (FS + LC + C), T2 (FS + LC) y T3 (FS + C) superó en 32, 26.1 y 16.7% al obtenido con el testigo positivo (T4 = FS: 20.3 t ha⁻¹), respectivamente. En T1 (FS + LC + C) se tuvieron los mayores rendimientos de chile jalapeño de tamaño grande (22 t ha⁻¹) o mediano (8.2 t ha⁻¹), los cuales superaron en 42.9, 64.2 y 73.2% o 27.7, 41.8 y 57.3% a los obtenidos en T2 (FS + LC), T3 (FS + C) y T4 (FS/TP), que fueron estadísticamente iguales entre sí. El rendimiento total o de tamaño extragrande, grande y mediano, obtenidos

Tabla 2. Influencia de fertilizantes sintéticos (FS), lombricomposta (LC) y CO₂ de compostaje (C) en el peso seco de la planta de chile jalapeño cultivada en mini-túnel.

Tratamientos	Total	Peso seco (g planta ⁻¹)		
		Tallos	Hojas	Raíces
T1 (FS + LC + C)	157.9 ± 1.5 a*	69.1 ± 0.3 a	57.0 ± 0.7 a	31.9 ± 0.9 a
T2 (FS + LC)	136.9 ± 1.1 b	59.1 ± 0.7 b	47.7 ± 1.3 b	30.1 ± 0.8 a
T3 (FS + C)	113.2 ± 3.0 c	46.4 ± 1.1 c	43.3 ± 1.2 b	23.5 ± 0.9 b
T4 (FS/TP)	104.4 ± 2.3 c	43.6 ± 0.8 c	38.5 ± 0.6 c	22.3 ± 1.4 b
T5 (LC + C)	92.3 ± 0.8 d	40.6 ± 0.5 c	34.7 ± 0.5 c	17.0 ± 0.7 c
T6 (LC)	75.3 ± 1.0 e	32.9 ± 2.2 d	25.9 ± 1.3 d	16.4 ± 0.9 c
T7 (C)	65.1 ± 1.8 f	30.7 ± 0.7 de	22.0 ± 0.5 d	12.4 ± 1.5 cd
T8 (TN)	53.2 ± 3.3 g	25.7 ± 2.2 e	17.5 ± 0.8 e	10.0 ± 0.6 d
DMS	9.9	6.2	4.5	5.0

TP = testigo positivo. TN = testigo negativo. DMS = diferencia mínima significativa. *Medias ± error estándar con letras iguales dentro de cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

Tabla 3. Influencia de fertilizantes sintéticos (FS), lombricomposta (LC) y CO₂ de compostaje (C) en el rendimiento total y de tamaños comerciales de chile jalapeño cultivado en mini-túnel.

Tratamientos	Total	Rendimiento (t ha ⁻¹)		
		Extragrande	Grande	Mediano
T1 (FS + LC + C)	61.8 ± 3.0 a*	26.8 ± 1.2 a	22.0 ± 0.9 a	12.9 ± 1.3 a
T2 (FS + LC)	51.1 ± 1.3 b	25.6 ± 1.2 a	15.4 ± 0.3 b	10.1 ± 0.6 ab
T3 (FS + C)	46.2 ± 0.9 bc	23.7 ± 0.3 ab	13.4 ± 0.9 b	9.1 ± 0.3 b
T4 (FS/TP)	41.2 ± 1.7 c	20.3 ± 1.6 b	12.7 ± 1.1 b	8.2 ± 0.9 bc
T5 (LC + C)	16.3 ± 0.3 d	6.1 ± 0.2 c	4.6 ± 0.2 c	5.6 ± 0.1 c
T6 (LC)	15.1 ± 0.4 d	5.2 ± 0.2 cd	4.6 ± 0.2 c	5.3 ± 0.1 c
T7 (C)	4.0 ± 0.2 e	1.2 ± 0.1 de	1.6 ± 0.1 d	1.2 ± 0.0 d
T8 (TN)	3.1 ± 0.1 e	0.9 ± 0.1 e	1.3 ± 0.1 d	0.9 ± 0.1 d
DMS	6.3	4.2	2.9	2.9

TP = testigo positivo. TN = testigo negativo. DMS = diferencia mínima significativa. *Medias ± error estándar con letras iguales dentro de cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

con los tratamientos sin fertilización sintética (T5 a T8), fueron significativamente menores en comparación con el testigo positivo.

DISCUSIÓN

Concentración de CO₂ dentro de los mini-túneles

La mayor contribución al incremento del CO₂ en el aire interno de los mini-túneles fue ocasionada por el compostaje, debido a la descomposición de los materiales orgánicos y la respiración de los microorganismos activos (Velasco-Velasco *et al.* 2004, Kalamdhad *et al.* 2008, Romero-Yam *et al.* 2015). Después se ubicó la contribución de la lombricomposta incorporada al suelo, con la cual suele incrementarse la materia orgánica, la densidad microbiana y la respiración edáfica (Mogollón *et al.* 2014, Yazdanpanaha *et al.* 2016). La fertilización sintética tuvo

la menor contribución al incremento del CO₂ en el aire interno de los mini-túneles; lo cual concuerda con Chen *et al.* (2018), quienes encontraron que los fertilizantes orgánicos fueron más eficaces que los inorgánicos para estimular la respiración microbiana del suelo.

Crecimiento de las plantas

En el crecimiento de plantas cultivadas bajo condiciones protegidas, hay una interacción positiva cuando la nutrición con base en fertilizantes sintéticos es combinada con lombricomposta (Islam *et al.* 2017) u otros abonos orgánicos (Zhao *et al.* 2017), la cual se correlaciona con aumentos en el contenido de nutrientes esenciales altamente asimilables (N, P, K, Ca, Mg, Cu y Zn, entre otros) y sustancias promotoras del crecimiento (fitohormonas, ácidos húmicos y fúlvicos, entre otros), presentes en los abonos

orgánicos y disponibles tiempo después a partir de la materia orgánica sometida a la transformación microbiana (García *et al.* 2012, Aremu *et al.* 2015, Gomes-Júnior *et al.* 2019). Elevadas concentraciones de CO₂ en el aire también tienen efectos positivos en el crecimiento vegetal, ya que Kumari *et al.* (2019), al cultivar pimiento (*Capsicum annuum*) en condiciones protegidas, observaron mayor altura de plantas (111.0 cm) con CO₂ elevado (550 ± 10 ppm) en comparación con la altura (74.6 cm) de aquellas cultivadas en CO₂ ambiente (350 ± 10 ppm), debido a una mayor división, expansión y diferenciación celular por influencia de la mayor concentración de CO₂.

La mayor disponibilidad de elementos esenciales altamente asimilables (N, P, K, Ca, Mg, Cu, Zn, entre otros), como principal promotor del diámetro de tallo, concuerda con lo encontrado por Castellanos *et al.* (2017) e Islam *et al.* (2017). Aunado a ello, el balance endógeno de citocininas con otras fitohormonas ocasionado por la lombricomposta, el cual también induce engrosamiento del tallo (Matsumoto-Kitano *et al.* 2008, Yong *et al.* 2014).

Los valores SPAD de T1 (FS + LC + C) y T2 (FS + LC) concuerdan con los informados por Zaccardelli *et al.* (2018) en *Capsicum annuum* L., los cuales están estrechamente relacionados con mayor concentración de clorofila en las hojas y un mejor estado nutricional general, particularmente en nitrógeno (Swiader y Moore 2002), crecimiento vegetativo vigoroso y alta tasa fotosintética (Zuo *et al.* 2018).

Eficiencia fotosintética/producción de materia seca

El CO₂ fijado por las plantas es el resultado de la diferencia entre el CO₂ atmosférico absorbido durante el proceso de la fotosíntesis y el CO₂ emitido a la atmósfera durante la respiración. Esa diferencia es convertida en biomasa y suele oscilar entre 45 y 50% del peso seco de la planta (Sofo *et al.* 2005). Al respecto Kumari *et al.* (2019) reportan que en pimiento (*Capsicum annuum*) bajo condiciones protegidas obtuvieron plantas con más peso fresco (460.1 g planta⁻¹) y seco (107.2 g planta⁻¹) con CO₂ elevado (550 ± 10 ppm) en comparación con la biomasa (349.3 y 77.6 g planta⁻¹) de plantas cultivadas a

CO₂ ambiente, debido al efecto de la fertilización carbónica que promovió una alta tasa de fotosíntesis y producción de más compuestos estructurales como carbohidratos, aminoácidos y proteínas.

Rendimiento de chile jalapeño

La interacción positiva entre la fertilización sintética, la lombricomposta y el CO₂ de compostaje incrementó el rendimiento de frutos, como consecuencia de aumentar eficiencia fisiológica y crecimiento vegetativo de las plantas de chile jalapeño, debido a que dispusieron de más dióxido de carbono en el aire (Kumari *et al.* 2019), más elementos esenciales altamente asimilables (Islam *et al.* 2017, Zhao *et al.* 2017) y sustancias promotoras del crecimiento (Aremu *et al.* 2015) en el suelo. Seufert *et al.* (2012) señalan que sin una fertilización adecuada se corre el riesgo de disminuir el potencial de rendimiento de los cultivos, pero que tal riesgo puede evitarse con la adición de compostas al suelo, cuyo aporte de microorganismos benéficos favorece el desdoblamiento y asimilación de la fertilización sintética.

CONCLUSIONES

El compostaje de materiales orgánicos y la incorporación de lombricomposta al suelo ocasionaron que la concentración de CO₂ se incrementara significativamente dentro de los mini-túneles. El crecimiento de las plantas y el rendimiento de chile jalapeño fueron incrementados cuando la fertilización sintética se combinó con lombricomposta y/o CO₂ de compostaje.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) por la beca otorgada durante los estudios de doctorado del primer autor. A las estudiantes de la Licenciatura en Ingeniería Agronómica, con acentuación en Horticultura (Facultad de Agronomía, UAS): Génesis Guadalupe Carrillo Sánchez, Guadalupe Petriz Murillo y Daniela Favela Olivas, por su valiosa colaboración.

LITERATURA CITADA

- Abbey L, Annan N, Asiedu SA, Esan EO, Iheshiulo EMA (2018) Amino acids, mineral nutrients, and efficacy of vermicompost and seafood and municipal solid wastes composts. *International Journal of Agronomy* 2018: 6419467. DOI: 10.1155/2018/6419467.
- Aremu AO, Stirk WA, Kulkarni MG, Tarkowská D, Turečková V, Gruz J, Šubrtová M, Pěňčík A, Novák O, Doležal K, Strnad M, Van Staden J (2015) Evidence of phytohormones and phenolic acids variability in garden-waste-derived vermicompost leachate, a well-known plant growth stimulant. *Plant Growth Regulation* 75: 483-492.
- Bekele A, Kibret K, Bedadi B, Yli-Halla M, Balemi T (2018) Effects of lime, vermicompost, and chemical P fertilizer on selected properties of acid soils of Ebantu District, Western highlands of Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science* 2018: 8178305. DOI: 10.1155/2018/8178305.
- Blouin M, Barrere J, Meyer N, Lartigue S, Barot S, Mathieu J (2019) Vermicompost significantly affects plant growth. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development* 39: 34. DOI: 10.1007/s13593-019-0579-x.
- Castellanos JZ, Cano-Ríos P, García-Carrillo EM, Olalde-Portugal V, Preciado-Rangel P, Ríos-Plaza JL, García-Hernández JL (2017) Hot pepper (*Capsicum annuum* L.) growth, fruit yield, and quality using organic sources of nutrients. *Compost Science & Utilization* 25: (sup1): S70-S77.
- Chen Z, Xu Y, He Y, Zhou X, Fan J, Yu H, Ding W (2018) Nitrogen fertilization stimulated soil heterotrophic but not autotrophic respiration in cropland soils: A greater role of organic over inorganic fertilizer. *Soil Biology and Biochemistry* 116: 253-264.
- Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M, Robledo CW (2018) InfoStat versión 2018. Centro de transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>. Fecha de consulta: 25 de enero de 2021.
- Eldridge SM, Yin Chan K, Donovan NJ, Saleh F, Orr L, Barchia I (2018) Agronomic and economic benefits of green-waste compost for peri-urban vegetable production: implications for food security. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 111: 155-173.
- Ferraz-Ramos R, Santana NA, Andrade N, Romagna IS, Tirloni B, Silveira AO, Domínguez J, Jacques RJS (2022) Vermicomposting of cow manure: Effect of time on earthworm biomass and chemical, physical, and biological properties of vermicompost. *Bioresource Technology* 345: 126572. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126572.
- García AC, Santos LA, Izquierdo FG, Sperandio MVL, Castro RN, Berbara RLL (2012) Vermicompost humic acids as an ecological pathway to protect rice plant against oxidative stress. *Ecological Engineering* 47: 203-208.
- García E (2004) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM. México. 90p.
- Gomes-Júnior GA, Pereira RA, Sodr e GA, Gross E (2019) Humic acids from vermicompost positively influence the nutrient uptake in mangosteen seedlings. *Pesquisa Agropecu ria Tropical* 49: e55529. DOI: 10.1590/1983-40632019v49e5529.
- Hu X, Zhang T, Tian G, Zhang L, Bian B (2021) Performance and mechanism of high-speed vermicomposting of dewatered sludge using a new type of laboratory earthworm reactor. *Environmental Science and Pollution Research* 28: 26132-26144.

- Islam MA, Islam S, Akter A, Rahman MH, Nandwani D (2017) Effect of organic and inorganic fertilizers on soil properties and the growth, yield and quality of tomato in Mymensingh, Bangladesh. *Agriculture* 7(3): 18. DOI: 10.3390/agriculture7030018.
- Kalamdhad AS, Pasha M, Kazmi AA (2008) Stability evaluation of compost by respiration techniques in a rotatory drum composter. *Resources, Conservation and Recycling* 52: 829-834.
- Kumar S, Tripathi G, Mishra GV (2021) A comparative study on agrowaste conversion into biofertilizer employing two earthworm species. *Applied Ecology and Environmental Sciences* 9: 280-285.
- Kumari M, Verma SC, Bhardwaj SK (2019) Effect of elevated CO₂ and temperature on crop growth and yield attributes of bell pepper (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Agrometeorology* 21: 1-6. DOI: 10.54386/jam.v21i1.195.
- Li J, Hoang KTK, Hassan N, Marschner P (2019) Vermicompost influences soil P pools and available N-Effect of placement and combination with inorganic fertilizer. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 19: 900-905.
- Mahmud M, Abdullah R, Yaacob JS (2018) Effect of vermicompost amendment on nutritional status of sandy loam soil, growth performance, and yield of pineapple (*Ananas comosus* var. MD2) under field conditions. *Agronomy* 8: 183. DOI: 10.3390/agronomy8090183.
- Makkar C, Singh J, Parkash C (2019) Modulatory role of vermicompost and vermiwash on growth, yield and nutritional profiling of *Linum usitatissimum* L. (Linseed): a field study. *Environmental Science and Pollution Research* 26: 3006-3018.
- Matsumoto-Kitano M, Kusumoto T, Tarkowski P, Kinoshita-Tsujimura K, Václavíková K, Miyawaki K, Kakimoto T (2008) Cytokinins are central regulators of cambial activity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105: 20027-20031.
- Mogollón JP, Tremont O, Rodriguez N (2014) Efecto del uso de un vermicompost sobre las propiedades biológicas y químicas de suelos degradados por sales. *Venesuelos* 9: 48-57.
- Neha, Bhardwaj Y, Sharma MP, Pandey J, Dubey SK (2022) Response of crop types and farming practices on soil microbial biomass and community structure in tropical agroecosystem by lipid biomarkers. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 22: 1618-1631.
- Panico SC, Memoli V, Napoletano P, Esposito F, Colombo C, Maisto G, De Marco A (2019) Variation of the chemical and biological properties of a technosol during seven years after a single application of compost. *Applied Soil Ecology* 138: 156-159.
- Ravindran B, Wong JWC, Selvam A, Sekaran G (2016) Influence of microbial diversity and plant growth hormones in compost and vermicompost from fermented tannery waste. *Bioresource Technology* 217: 200-204.
- Rékási M, Mazsu N, Draskovits E, Bernhardt B, Szabó A, Rivier P-A, Farkas C, Borsányi B, Pirkó B, Molnár S, Kátay G, Uzinger N (2019) Comparing the agrochemical properties of compost and vermicomposts produced from municipal sewage sludge digestate. *Bioresource Technology* 291: 121861. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121861.
- Romero-Yam LA, Almaraz-Suárez JJ, Velasco-Velasco J, Galvis-Spinola A, Gavi-Reyes F (2015) Microbial dynamics during composting of filter cake reactivated with chicken manure. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 21: 21-31.
- Scotti R, Bonanomi G, Scelza R, Zoina A, Rao MA (2015) Organic amendments as sustainable tool to recovery fertility in intensive agricultural systems. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 15: 333-352.

- SE (2015) Norma Mexicana NMX-FF-025-SCFI-2014. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano - chile fresco (*Capsicum* spp.) - especificaciones (cancela a la NMX-FF-025-SCFI-2007). Secretaría de Economía. Diario Oficial de la Federación. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5379404&fecha=23/01/2015. Fecha de consulta: 28 de diciembre de 2020.
- Seufert V, Ramankutty N, Foley JA (2012) Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature* 485: 229-231.
- Sharma D, Varma VS, Yadav KD, Kalamdhad AS (2017) Evolution of chemical and biological characterization during agitated pile composting of flower waste. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture* 6: 89-98.
- Sofo A, Nuzzo V, Palese AM, Xiloyannis C, Celano G, Zukowskyj P, Dichio B (2005) Net CO₂ storage in Mediterranean olive and peach orchards. *Scientia Horticulturae* 107: 17-24.
- Swiader JM, Moore A (2002) Spad-chlorophyll response to nitrogen fertilization and evaluation of nitrogen status in dryland and irrigated pumpkins. *Journal of Plant Nutrition* 25: 1089-1100.
- Velasco-Velasco J, Figueroa-Sandoval B, Ferrera-Cerrato R, Trinidad-Santos A, Gallegos-Sánchez J (2004) CO₂ and microbial population dynamics in manure and straw compost under aeration. *Terra Latinoamericana* 22: 307-316.
- Yazdanpanaha N, Mahmoodabadib M, Cerdàc A (2016) The impact of organic amendments on soil hydrology, structure and microbial respiration in semiarid lands. *Geoderma* 266: 58-65.
- Yong JW, Letham DS, Wong SC, Farquhar GD (2014) Rhizobium-induced elevation in xylem cytokinin delivery in pigeonpea induces changes in shoot development and leaf physiology. *Functional Plant Biology* 41: 1323-1335.
- Zaccardelli M, Pane C, Villecco D, Palese AM, Celano G (2018) Compost tea spraying increases yield performance of pepper (*Capsicum annuum* L.) grown in greenhouse under organic farming system. *Italian Journal of Agronomy* 13: 229-234.
- Zhao H-T, Li T-P, Zhang Y, Hu J, Bai Y-C, Shan Y-H, Ke F (2017) Effects of vermicompost amendment as a basal fertilizer on soil properties and cucumber yield and quality under continuous cropping conditions in a greenhouse. *Journal of Soils and Sediments* 17: 2718-2730.
- Zhao F, Zhang Y, Li Z, Shi J, Zhang G, Zhang H, Yang L (2020) Vermicompost improves microbial functions of soil with continuous tomato cropping in a greenhouse. *Journal of Soils and Sediments* 20: 380-391.
- Zuo Y, Zhang J, Zhao R, Dai H, Zhang Z (2018) Application of vermicompost improves strawberry growth and quality through increased photosynthesis rate, free radical scavenging and soil enzymatic activity. *Scientia Horticulturae* 233: 132-140.