



Carbono orgánico como sustituto parcial de fertilizantes químicos en el cultivo de pimienta (*Capsicum annuum* L.), variedad martha

Organic carbon as a partial substitute for chemical fertilizers in the cultivation of pepper (*Capsicum annuum*), martha variety

Pablo Israel Vargas-Guillén^{1*} , César Antonio Peña-Haro² , Ángel Santiago Carrasco-Schuldt² ,

María Magdalena Palacios-Gorostiza³

RESUMEN

En esta investigación se evaluó el impacto del carbono orgánico y el fertilizante combinado NPK en el cultivo de pimienta, con el objetivo de analizar los efectos de su aplicación conjunta sobre el crecimiento, desarrollo de frutos y la rentabilidad económica del cultivo. El estudio se llevó a cabo en los campos de la Universidad Agraria del Ecuador, utilizando un diseño de bloques completamente al azar con arreglo factorial A x B, en el que se aplicaron diferentes dosis de carbono orgánico (Factor A) y fertilizante NPK (Factor B). Los resultados mostraron que la incorporación de carbono orgánico favoreció el crecimiento de las plantas y aumentó la producción de frutos, siendo la combinación de 2.5 L/ha de carbono orgánico con 100% de fertilizante NPK fertilización mineral NPK la que presentó el mejor rendimiento, alcanzando una relación beneficio/costo de 0.8. Estos hallazgos sugieren que el uso de carbono orgánico junto con fertilizantes NPK al 100% es una opción económicamente viable para la producción de pimienta, especialmente en contextos agrícolas sostenibles.

Palabras clave: Carbono orgánico, fertilización orgánica, *Capsicum annuum* L., rendimiento de los cultivos, análisis coste-beneficio.

ABSTRACT

This study evaluated the impact of organic carbon and NPK fertilizer on pepper cultivation, with the aim of analyzing the effects of their combined application on growth, fruit development, and the economic profitability of the crop. The study was conducted in the fields of the Agrarian University of Ecuador, using a completely randomized block design with an A x B factorial arrangement, in which different doses of organic carbon (Factor A) and NPK fertilizer (Factor B) were applied. The results showed that the incorporation of organic carbon favored plant growth and increased fruit production, with the combination of 2.5 L/ha of organic carbon with 100% NPK mineral NPK fertilization showing the best yield, reaching a benefit/cost ratio of 0.8. These findings suggest that the use of organic carbon together with 100% NPK fertilizers is an economically viable option for pepper production, especially in sustainable agricultural contexts.

Keywords: Organic carbon, organic fertilization, *Capsicum annuum* L., crop yield, cost-benefit analysis.

¹Universidad Agraria del Ecuador, Facultad de Ciencias Agrarias, Guayaquil, Ecuador.

²Universidad Agraria del Ecuador, Milagro, Ecuador

³Universidad Agraria del Ecuador, El Triunfo, Ecuador

*Autor de correspondencia. E-mail: pvargas@uagraría.edu.ec

I. INTRODUCCIÓN

La escasez de agua representa una de las crisis más apremiantes a nivel mundial. Se estima que, para el año 2025, más de dos tercios de la población mundial enfrentará condiciones de estrés hídrico, lo que afecta gravemente la seguridad alimentaria global (Iturrat, 2020). En este contexto, el impacto del cambio climático en la agricultura es incuestionable, especialmente en cultivos sensibles como el pimiento (*Capsicum annuum* L.), que enfrenta una disminución en su productividad debido al estrés hídrico durante fases críticas como la floración y cuajado de frutos (Navarro 2024; Sabogal et al., 2025; González, 2019). Este desafío requiere soluciones innovadoras que no solo aborden la escasez de agua, sino también la sostenibilidad del suelo. La búsqueda de alternativas para la reducción del uso de fertilizantes químicos, sin sacrificar el rendimiento agrícola, ha llevado a explorar el carbono orgánico como una opción viable para mejorar la fertilidad del suelo en condiciones de estrés hídrico (C. A. Liu et al., 2013; Y. Liu et al., 2024; Singh et al., 2019).

El cultivo de pimiento variedad martha es de gran importancia tanto a nivel mundial como regional debido a su alta demanda en los mercados internacionales y su versatilidad culinaria (Devi et al., 2021; Romero-Carrión et al., 2026; Zohoungbogbo et al., 2025). Este cultivo es una de las principales fuentes de alimentos frescos y procesados en muchas culturas, siendo esencial para la preparación de una amplia variedad de platos en diferentes gastronomías. Además de su relevancia culinaria, el pimiento es altamente valorado por su contenido nutricional, especialmente en su forma fresca. Es una fuente excelente de vitamina C, que es esencial para el fortalecimiento del sistema inmunológico y la prevención de enfermedades respiratorias, como resfriados y gripes (De Cianni et al., 2024). Además, contiene vitamina A, minerales como potasio y magnesio, y antioxidantes como los carotenoides, que contribuyen a la salud ocular y la prevención de enfermedades crónicas, este perfil nutricional hace que el pimiento sea considerado un “superalimento” en diversas dietas, promoviendo la salud general y el bienestar (Olatunji & Afolayan, 2018; Shanmugham & Subban, 2022).

En Ecuador, el cultivo de pimiento, particularmente la variedad martha, posee una importancia económica significativa. El país cuenta con condiciones climáticas y suelos fértiles que favorecen la producción de pimiento de alta calidad, lo que lo convierte en un cultivo estratégico dentro del sector agrícola ecuatoriano (Carolina et al., 2023; Piperno, 2011). Ecuador es reconocido como un exportador importante de productos hortícolas, y el pimiento se posiciona como un producto clave en las exportaciones agrícolas, especialmente hacia mercados como los de Estados Unidos y la Unión Europea, donde los productos frescos y orgánicos tienen una creciente demanda (Terasemillas, 2025). Este cultivo no solo genera ingresos para los agricultores locales, sino que también fomenta el empleo en las zonas rurales y contribuye al crecimiento económico del país. La demanda de pimientos de alta calidad y la creciente preferencia por productos orgánicos en mercados internacionales hacen que la producción de pimiento sea una actividad de gran potencial económico, que puede convertirse en un motor de desarrollo agrícola sostenible en Ecuador (Jacobsen et al., 2023).

La agricultura convencional ha dependido históricamente de fertilizantes químicos para maximizar la productividad. Sin embargo, el uso intensivo de estos fertilizantes ha generado graves consecuencias ambientales, como la contaminación de aguas subterráneas y la degradación de los suelos (Romero-Carrión et al., 2026). La preocupación por los efectos adversos de los fertilizantes químicos ha impulsado la investigación en fertilizantes alternativos, destacando el carbono orgánico como una enmienda potencialmente beneficiosa. El carbono orgánico del suelo (COS) es un componente fundamental de la materia orgánica, que mejora la capacidad de retención de agua, optimiza la disponibilidad de nutrientes y favorece la actividad microbiana, elementos esenciales para el rendimiento sostenible de los cultivos (Amlinger et al., 2022; Lal, 2020). Sin embargo, a pesar de estos beneficios potenciales, el uso del carbono orgánico como sustituto parcial de fertilizantes químicos en cultivos específicos como el pimiento ha sido insuficientemente investigado (Hu et al., 2023).

Diversos estudios han demostrado que la integración de fertilizantes orgánicos e inorgánicos puede mejorar la eficiencia de los nutrientes y la sostenibilidad de los suelos. Por ejemplo, investigaciones previas sobre el uso de carbono orgánico en combinación con fertilizantes minerales han revelado mejoras en la estructura del suelo, así como en la retención de agua, lo que reduce la dependencia de riego (Brar et al., 2015). En el contexto del cultivo de pimiento, las investigaciones sobre el impacto de los fertilizantes orgánicos son limitadas, con pocos estudios que examinen específicamente la interacción entre carbono orgánico y fertilizantes NPK en condiciones de estrés hídrico. Estudios previos sobre el uso de biocarbón en cultivos hortícolas destacan la importancia de este tipo de prácticas para mitigar los efectos del estrés abiótico, aunque la aplicación en el pimiento sigue siendo un área poco explorada (Müftüoğlu & Başay, 2025).

Esta investigación ofrece una alternativa sostenible a los fertilizantes convencionales, al tiempo que aborda dos problemas interrelacionados: la escasez de agua y el impacto ambiental de los fertilizantes químicos. El estudio de la aplicación de carbono orgánico como sustituto parcial de fertilizantes NPK en el cultivo de pimiento tiene implicaciones tanto para la sostenibilidad agrícola como para la rentabilidad económica de los productores. A través de un diseño experimental realizado en los campos de la Universidad Agraria del Ecuador, este estudio busca evaluar cómo la combinación de carbono orgánico y fertilizantes NPK impacta el rendimiento agronómico, la producción de frutos y la rentabilidad del cultivo de pimiento en condiciones de limitación hídrica.

El objetivo principal de esta investigación es analizar los efectos de la aplicación de carbono orgánico en combinación con fertilizantes NPK sobre el crecimiento, desarrollo de frutos y la rentabilidad económica del cultivo de pimiento en condiciones de campo. Para ello, se empleó un diseño experimental de bloques aleatorizados con un arreglo factorial A x B, en el que se evaluaron diferentes dosis de carbono orgánico y fertilizantes NPK. Este enfoque permitirá determinar la viabilidad económica de

la aplicación de carbono orgánico como sustituto parcial de fertilizantes químicos, contribuyendo a una producción agrícola más sostenible y rentable. Los resultados de este estudio ofrecerán información valiosa para los agricultores, brindando opciones de fertilización más ecológicas y rentables para el cultivo de pimiento, especialmente en regiones afectadas por la escasez de agua.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

Diseño experimental y condiciones del ensayo

El estudio se desarrolló bajo un enfoque experimental, orientado a evaluar el uso de diferentes dosis de carbono orgánico como sustituto parcial de la fertilización química convencional en el cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.) variedad martha.

El experimento se estableció bajo un diseño factorial 4×2 , con ocho tratamientos y tres repeticiones, totalizando 24 unidades experimentales. Las características generales del área de estudio se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos del diseño experimental del estudio

Descripción	Dimensiones
Número de tratamientos	8
Número de repeticiones	3
Total de parcelas del área de estudio	24
Hileras por parcela	5
Hileras útiles por parcela	3
Distanciamiento entre tratamientos	1 m
Ancho de la parcela	4 m
Largo de la parcela	4 m
Distanciamiento entre hilera	1.2 m
Distanciamiento entre planta	0.50 m
Número de plantas por parcela	32 plantas
Número de plantas del área de estudio	768 plantas
Área total de la parcela	16 m ²
Área total del experimento	546 m ²

El área total del experimento fue de 546 m², con parcelas de 16 m² (4 m × 4 m), distribuidas con un distanciamiento entre hileras de 1.2 m y entre plantas de 0.50 m, estableciendo 32 plantas por parcela y un total de 768 plantas en el ensayo.

Manejo agronómico del cultivo

Producción de plántulas

El semillero se estableció en bandejas germinadoras utilizando turba como sustrato principal. En cada cavidad se depositaron una a dos semillas de la variedad martha, manteniendo condiciones adecuadas de humedad para favorecer la germinación y emergencia uniforme de las plántulas.

Preparación del terreno

El terreno fue sometido a una limpieza inicial de malezas, seguida de un pase de rastra para mejorar la estructura superficial del suelo. Posteriormente, se trazaron los surcos correspondientes a cada tratamiento experimental.

Trasplante

El establecimiento definitivo del cultivo se realizó mediante trasplante cuando las plantas presentaban de dos a tres hojas verdaderas. El marco de plantación utilizado fue de 1.2 m × 0.50 m.

Riego

El suministro hídrico se efectuó mediante riego por gravedad, aplicándose dos veces por semana durante todo el ciclo del cultivo, asegurando niveles adecuados de humedad en el suelo.

Manejo de arvenses

El control de arvenses se realizó mediante deshierbe manual. Previo a la siembra, se aplicó un herbicida preemergente a base de pendimetalina en dosis de 100 cc por 20 L de agua. Posteriormente, se realizaron labores manuales de control durante el desarrollo del cultivo.

Manejo fitosanitario

El control de plagas se enfocó principalmente en mosca blanca, utilizando insecticidas a base de acetamiprid (200 g/L). Para el manejo de antracnosis se aplicó óxido cuproso al 75%.

Programa de fertilización

Se aplicaron diferentes dosis de carbono orgánico formulado a base de gallinaza y ácidos húmicos, asperjado vía foliar a los 15, 30 y 45 días después de la siembra, según los tratamientos establecidos.

La fertilización química convencional consideró los siguientes requerimientos nutricionales: nitrógeno:

150 kg/ha (Urea 46-00-00), fósforo: 60 kg/ha (DAP 18-46-00) y potasio: 180 kg/ha (MOP 00-00-60).

El fósforo se aplicó en un 100% al momento del trasplante. La urea y el potasio se fraccionaron en tres aplicaciones: 30% a los 15 días, 40% a los 30 días y 30% a los 45 días. En los tratamientos con 80% de NPK, se aplicó la mitad de la primera dosis direccionada hacia la base de la planta.

Cosecha

La cosecha se realizó manualmente cuando los frutos alcanzaron madurez comercial, caracterizada por piel lisa, brillante y color verde uniforme. Se efectuaron tres cosechas durante el ciclo productivo.

Variables evaluadas

Altura de planta (cm)

Se seleccionaron 10 plantas al azar dentro de las hileras útiles de cada parcela. Las mediciones se realizaron a los 30, 45 y 60 días después del trasplante utilizando cinta métrica.

Número de frutos por planta (n)

En las mismas 10 plantas evaluadas se contabilizó el número total de frutos, calculando el promedio por tratamiento.

Longitud del fruto (cm)

Se midió con cinta métrica al momento de la cosecha en las plantas seleccionadas.

Diámetro del fruto (cm)

Se determinó mediante calibrador, expresándose en centímetros.

Peso del fruto (g)

Se registró individualmente con balanza digital en cada cosecha.

Rendimiento (kg/ha)

El rendimiento se calculó a partir del peso total de frutos por tratamiento, extrapolado a kg/ha mediante regla de tres simple.

Relación Beneficio/Costo (B/C)

El análisis económico consideró costos fijos y variables para cada tratamiento. Se utilizó la siguiente ecuación:

Relación Beneficio/Costo = (Ingreso total / Costo total) – 1

Tratamientos evaluados

Tabla 2. Tratamientos aplicados en el estudio

Tratamientos	Frecuencia de aplicación (días después de siembra)
T1 (Factor A Carbono Orgánico 1.0 L/Ha) + (80%NPK)	15 – 30 - 45
T2 (Factor A Carbono Orgánico 2.0 L/Ha + (80% NPK)	15 – 30 – 45
T3 (Factor A Carbono Orgánico 2.5 L/Ha + (80% NPK)	15 – 30 - 45
T4 (Factor A Carbono Orgánico 0 L/Ha + (80% NPK)	15 – 30 - 45
T5 (Factor A Carbono Orgánico 1.0 L/Ha + (100% NPK)	15 – 30 - 45
T6 (Factor A Carbono Orgánico 2.0 L/Ha + (100% NPK)	15 – 30 - 45
T7 (Factor A Carbono Orgánico 2.5 L/Ha + (100% NPK)	15 – 30 - 45
T8 (Factor A Carbono Orgánico 0 L/Ha + (Factor B 100%NPK)	15 – 30 - 45

Análisis estadístico

Los datos recolectados fueron procesados inicialmente en Excel para organización y cálculo preliminar. Posteriormente, el análisis estadístico se realizó mediante el software Infostat.

Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) bajo el modelo factorial 4×2 . Las comparaciones de medias se efectuaron mediante la prueba de Tukey al 5% de probabilidad ($p < 0.05$).

Tabla 3. Modelo estadístico Anova

Fuente de Variación	Grados de libertad
Factor A (A- 1) (4 - 1)	3
Factor B (B- 1) (2 - 1)	1
Repeticiones R-1	2
Interacción (A - 1) (B - 1)	3
Error (a=4, b=2, r=3 $\rightarrow (8-1)(3-1)=14$)	14
Total (AxB+R- 1) (4 x 2 X3- 1)	23

III. RESULTADOS**Altura de planta**

La variable altura de planta (Tabla 4) presentó un coeficiente de variación (CV) de 2.42%, lo que evidencia alta precisión experimental y baja dispersión de los datos. Se detectaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. El tratamiento 7 (C. Orgánico 2.5 L/Ha + 100% NPK) alcanzó la mayor altura promedio (120.18 cm), seguido del tratamiento 6 (113.18 cm) y el tratamiento 3 (109.18 cm), conformando tres grupos estadísticamente diferenciados según la prueba de Tukey. El tratamiento 1 registró la menor altura (102.18 cm).

En el análisis factorial, el Factor A (dosis de carbono orgánico) mostró diferencias significativas, siendo la dosis de 2.5 L/Ha la que presentó la mayor altura promedio (114.68 cm). El Factor B evidenció superioridad del 100% de NPK, con un promedio de 111.6 cm.

Tabla 4. Altura de planta

Tratamiento	Interacción	Altura (cm)	Tukey
7	(C. Orgánico 2.5 L/Ha + (100% NPK))	120.18	a
6	(C. Orgánico 2.0 L/Ha + (100% NPK))	113.18	b
3	(C. Orgánico 2.5 L/Ha + (80% NPK))	109.18	b c
2	(C. Orgánico 2.0 L/Ha + (80% NPK))	107.18	b c d
5	(C. Orgánico 1.0 L/Ha + (100% NPK))	107.18	b c d
8	(C. Orgánico 0 L/Ha + (100% NPK))	106.18	c d
4	(C. Orgánico 0 L/Ha + (80% NPK))	103.2	c d
1	(C. Orgánico 1.0 L/Ha) + (80%NPK))	102.18	d
CV:	2.42%		

Número de frutos por planta

El análisis de varianza evidenció diferencias altamente significativas entre tratamientos ($F = 8.12$; $p < 0.001$), indicando un efecto directo de las combinaciones de fertilización sobre la productividad. El tratamiento 7 registró el mayor número de frutos por planta (32.08), seguido por los tratamientos 3 (29.88), 6 (26.98) y 5 (25.48), los cuales conformaron los grupos superiores según Tukey. El tratamiento 8 presentó el menor valor (15.68 frutos/planta). El coeficiente de variación fue de 7.47%, considerado aceptable para esta variable productiva.

El Factor A mostró diferencias estadísticas, destacándose la dosis de 2.5 L/Ha de carbono orgánico con el mayor promedio. En contraste, el Factor B no presentó efecto significativo sobre el número de frutos (Tabla 5).

Tabla 5. Número de frutos por planta

Tratamiento	Interacción	# de frutos/planta	Tukey
7	(C. Orgánico 2.5 L/Ha + (100% NPK))	32.08	a
3	(C. Orgánico 2.5 L/Ha + (80% NPK))	29.88	b
6	(C. Orgánico 2.0 L/Ha + (100% NPK))	26.98	b c
5	(C. Orgánico 1.0 L/Ha + (100% NPK))	25.48	c
2	(C. Orgánico 2.0 L/Ha + (80% NPK))	25.18	c
1	(C. Orgánico 1.0 L/Ha) + (80%NPK))	23.68	c d
4	(C. Orgánico 0 L/Ha + (80% NPK))	19.88	d e
8	(C. Orgánico 0 L/Ha + (100% NPK))	15.68	e
CV:	7.47%		

Longitud de fruto

En la Tabla 6, se observaron diferencias significativas entre tratamientos para la longitud del fruto ($F = 4.05$; $p = 0.002$). El tratamiento 7 presentó la mayor longitud promedio (15.9 cm), seguido del tratamiento 2 (15.3 cm), constituyendo los valores superiores según Tukey. El coeficiente de variación fue de 3.63%, indicando adecuada uniformidad experimental (Tabla 6).

En el análisis por factores, las dosis de 2.5 y 2.0 L/Ha de carbono orgánico mostraron los mayores promedios (15.30 y 15.25 cm, respectivamente). El porcentaje de NPK (Factor B) no generó diferencias significativas.

Tabla 6. Longitud del fruto

Tratamiento	Interacción	Interacción Longitud del fruto (cm)	Tukey
7	(C. Orgánico 2.5 L/Ha + (100%NPK))	15.9	a
2	(C. Orgánico 2.0 L/Ha + (80% NPK))	15.3	ab
6	(C. Orgánico 2.0 L/Ha + (100% NPK))	15.2	ab
3	(C. Orgánico 2.5 L/Ha + (80% NPK))	14.7	abc
1	(C. Orgánico 1.0 L/Ha) + (80%NPK))	14.43	bcd
4	(C. Orgánico 0 L/Ha) + (80%NPK))	14.4	bcd
8	(C. Orgánico 0 L/Ha + (100% NPK))	13.7	cd
5	(C. Orgánico 1.0 L/Ha + (100% NPK))	13.2	d
CV:	3.63%		

Diámetro de fruto

La Tabla 7 muestra que no se detectaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos para el diámetro del fruto ($F = 1.16$; $p = 0.34$). Todos los tratamientos fueron estadísticamente similares según la prueba de Tukey, reflejado en la asignación uniforme de la letra “a”. El coeficiente de variación fue de 10.33%. Tampoco se observaron efectos significativos de los factores A ni B.

Tabla 7. Diámetro de fruto

Tratamiento	Interacción	Diámetro (cm)	Tukey
6	(C. Orgánico 2.0 L/Ha + (100% NPK))	5.1	a
5	(C. Orgánico 1.0 L/Ha + (100% NPK))	5	a
8	(C. Orgánico 0 L/Ha + (100% NPK))	4.9	a
2	(C. Orgánico 2.0 L/Ha + (80% NPK))	4.7	a
3	(C. Orgánico 2.5 L/Ha + (80% NPK))	4.6	a
1	(C. Orgánico 1.0 L/Ha) + (80%NPK))	4.43	a
7	(C. Orgánico 2.5 L/Ha + (100% NPK))	4.4	a
4	(C. Orgánico 0 L/Ha + (80% NPK))	4.1	a
CV:	10.33%		

Peso de fruto

En la Tabla 8, se puede apreciar que aunque el tratamiento 6 presentó el mayor peso promedio (120.85 g), seguido de los tratamientos 5 (115.3 g) y 8 (115.1 g), no se registraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. El coeficiente de variación fue de 10.33%.

El Factor A no mostró diferencias significativas entre dosis de carbono orgánico, con valores que oscilaron entre 114.55 g y 103.11 g. En el Factor B, el 100% de NPK presentó el mayor promedio (112.90 g), superando al 80% (103.53 g), aunque sin diferencias estadísticas significativas.

Tabla 8. Peso del fruto

Tratamiento	Interacción	Peso (g.)	Tukey
6	(C. Orgánico 2.0 L/Ha + (100% NPK))	120.85	a
5	(C. Orgánico 1.0 L/Ha + (100% NPK))	115.3	a
8	(C. Orgánico 0 L/Ha + (100% NPK))	115.1	a
2	(C. Orgánico 2.0 L/Ha + (80% NPK))	108.25	a
3	(C. Orgánico 2.5 L/Ha + (80% NPK))	105.88	a
1	(C. Orgánico 1.0 L/Ha) + (80%NPK)	103.5	a
7	(C. Orgánico 2.5 L/Ha + (100% NPK))	100.35	a
4	Orgánico 0 L/Ha + (80% NPK)	96.5	a
CV:	10.33%		

Rendimiento

Se observaron diferencias significativas en el rendimiento del cultivo (Tabla 9). El tratamiento 7 alcanzó el mayor rendimiento (36,750.0 kg/ha), siendo estadísticamente superior al tratamiento 4 (28,937.5 kg/ha), el cual presentó el valor más bajo. Los tratamientos 3, 6, 2, 5 y 1 mostraron rendimientos intermedios sin diferencias significativas entre ellos, compartiendo el mismo grupo estadístico.

El Factor A evidenció diferencias significativas entre tratamientos con aplicación de carbono orgánico respecto al testigo sin aplicación. El Factor B no mostró diferencias significativas entre los niveles de NPK. El coeficiente de variación fue de 8.51%, indicando adecuada confiabilidad experimental.

Tabla 9. Rendimiento

Tratamiento	Interacción	Rendimiento (kg/ha)	Tukey
7	(C. Orgánico 2.5 L/Ha) + (100% NPK)	36,750.0	a
3	(C. Orgánico 2.5 L/Ha) + (80% NPK)	35,562.5	a
6	(C. Orgánico 2.0 L/Ha) + (100% NPK)	34,525.0	ab
2	(C. Orgánico 2.0 L/Ha) + (80% NPK)	33,875.0	ab
5	(C. Orgánico 1.0 L/Ha) + (100% NPK)	33,250.0	ab
1	(C. Orgánico 1.0 L/Ha) + (80%NPK)	31,375.0	ab
8	(C. Orgánico 0 L/Ha) + (100% NPK)	30,312.5	ab
4	(C. Orgánico 0 L/Ha) + (80% NPK)	28,937.5	b
CV:	8.51%		

Análisis económico y relación beneficio/costo

Como muestra la Tabla 10, el mayor rendimiento correspondió al tratamiento 7 (36,750.0 kg/ha), que ajustado al 10% por pérdidas postcosecha, fue de 33,075.0 kg/ha. En términos económicos, los tratamientos T3 y T7 presentaron la mayor rentabilidad, ambos con una relación beneficio/costo (B/C) de 0.8, al aplicar 2.5 L/Ha de carbono orgánico combinado con 80% y 100% de NPK, respectivamente.

Los tratamientos T4 y T8 registraron las menores relaciones B/C (0.5). En general, todos los tratamientos presentaron valores positivos de rentabilidad, confirmando la viabilidad económica del manejo nutricional evaluado.

Tabla 10. Análisis económico

Tratamiento	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Rend/kg/ha	31,375.0	33,875.0	35,562.5	28,937.5	33,250.0	34,525.0	36,750.0	30,312.5
Rend 10%	28,237.5	30,487.5	32,006.3	26,043.8	29,925.0	31,072.5	33,075.0	27,281.3
Precio x kilo	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Costo variable	391.0	430.0	449.5	352.0	479.0	518.0	537.5	440.0
Costo fijo	4,000.0	4,000.0	4,000.0	4,000.0	4,000.0	4,000.0	4,000.0	4,000.0
Costo total C	4,391.0	4,430.0	4,449.5	4,352.0	4,479.0	4,518.0	4,537.5	4,440.0
Beneficio B	7,059.4	7,621.9	8,001.6	6,510.9	7,481.3	7,768.1	8,268.8	6,820.3
Utilidad	2,668.4	3,191.9	3,552.1	2,158.9	3,002.3	3,250.1	3,731.3	2,380.3
R B/C	0.6	0.7	0.8	0.5	0.7	0.7	0.8	0.5

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que la incorporación de carbono orgánico en combinación con fertilización mineral (NPK) mejora de manera consistente el desempeño agronómico y productivo del cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.), particularmente en variables como altura de planta, número de frutos y rendimiento. El efecto fue más pronunciado en el tratamiento T7 (2.5 L/ha de carbono orgánico + 100% NPK), lo que sugiere una interacción sinérgica entre la fuente orgánica y la fertilización convencional.

Estudios recientes respaldan estos hallazgos. Zhang et al. (2023) demostraron que la combinación de enmiendas orgánicas basadas en carbono con reducción parcial de fertilizantes químicos permite mantener o incluso incrementar la productividad del pimiento, mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes y optimizar la rentabilidad del sistema productivo. En su estudio, la aplicación de carbono orgánico permitió sustituir hasta el 30% del fertilizante químico sin comprometer el rendimiento, lo que coincide con la tendencia observada en el presente trabajo, donde los tratamientos con carbono orgánico mostraron superioridad frente al testigo sin aplicación.

Desde el punto de vista edáfico, la incorporación de carbono orgánico contribuye a mejorar la estructura del suelo, la capacidad de retención de agua, la actividad microbiana y la disponibilidad gradual de nutrientes. Estas mejoras se traducen en un entorno rizosférico más estable y eficiente,

favoreciendo la absorción de nitrógeno y fósforo, así como el desarrollo vegetativo. Estudios recientes en sistemas hortícolas intensivos han señalado que las enmiendas orgánicas aumentan la eficiencia en el uso del nitrógeno y reducen pérdidas por lixiviación, mejorando simultáneamente el rendimiento del cultivo (Lévesque et al., 2020).

En concordancia con lo anterior, Kumar et al. (2018) reportaron incrementos significativos en número y peso de frutos de pimiento tras la aplicación sostenida de fuentes orgánicas de carbono durante varios ciclos productivos, atribuyendo estos efectos a una mejora progresiva de las propiedades físicas y biológicas del suelo. Aunque dicho estudio es previo a los últimos cinco años, la evidencia experimental sigue siendo consistente con investigaciones más recientes sobre manejo integrado de fertilización en cultivos hortícolas.

En el presente estudio, el tratamiento T7 mostró el mayor rendimiento (36.750 kg/ha), mientras que el tratamiento T4 (80% NPK sin carbono orgánico) presentó los valores más bajos. Este contraste sugiere que la fertilización exclusivamente mineral, aun cuando es técnicamente adecuada, no optimiza completamente el potencial productivo del cultivo bajo las condiciones evaluadas. La incorporación de carbono orgánico no solo actúa como fuente nutricional complementaria, sino también como modulador del sistema suelo-planta, favoreciendo procesos fisiológicos asociados al crecimiento vegetativo y al establecimiento reproductivo.

Investigaciones recientes han demostrado que las enmiendas orgánicas incrementan la biomasa radical, mejoran la arquitectura del sistema radicular y estimulan la actividad enzimática del suelo, factores directamente relacionados con la mayor eficiencia de absorción de nutrientes (Jabborova et al., 2021; Song et al., 2020). Este mecanismo podría explicar el incremento observado en altura de planta y número de frutos por planta en los tratamientos con mayores dosis de carbono orgánico.

Desde el enfoque productivo, el aumento en número de frutos tuvo mayor incidencia sobre el rendimiento que el peso individual del fruto, variable que no mostró diferencias estadísticas significativas. Este comportamiento sugiere que la respuesta del cultivo estuvo más asociada a la diferenciación floral y al cuajado de frutos que a la expansión celular del fruto, lo cual coincide con estudios que reportan que el manejo nutricional equilibrado influye principalmente en la fase reproductiva del pimiento (Haghighi et al., 2025; Xu et al., 2001; Yan et al., 2024).

En términos económicos, los tratamientos T3 y T7 presentaron la mayor relación beneficio/costo (0.8), lo que confirma que la integración de carbono orgánico no solo mejora parámetros agronómicos sino que fortalece la sostenibilidad financiera del sistema productivo. La rentabilidad observada coincide con reportes recientes en sistemas hortícolas intensivos, donde la combinación de fertilización orgánica y mineral reduce costos a mediano plazo al mejorar la eficiencia del uso de insumos (Araújo et al., 2018; Möller, 2018; Mucheru-Muna et al., 2014).

Es importante destacar que el efecto positivo del carbono orgánico depende de la dosis aplicada y de su integración con fertilización mineral balanceada. El hecho de que el Factor B (porcentaje de NPK) no mostrara diferencias significativas en algunas variables sugiere que la respuesta productiva no depende exclusivamente del nivel de fertilización química, sino de la interacción entre disponibilidad nutricional, dinámica del carbono en el suelo y fisiología del cultivo.

En conjunto, los resultados respaldan el enfoque de manejo integrado de fertilización como estrategia viable para incrementar productividad, eficiencia de uso de nutrientes y rentabilidad en el cultivo de pimiento bajo condiciones similares a las evaluadas. Además, la evidencia sugiere que la incorporación de carbono orgánico puede contribuir a la sostenibilidad del sistema agrícola al mejorar la calidad del suelo y reducir la dependencia exclusiva de fertilizantes sintéticos.

V. CONCLUSIONES

Se destacan las ventajas tanto ambientales como económicas del uso de carbono orgánico como sustituto parcial de los fertilizantes químicos. La combinación de carbono orgánico con fertilizantes NPK ha demostrado ser eficaz en el incremento de la productividad y la mejora de la calidad del suelo, lo que a su vez incrementa la rentabilidad del cultivo. Sin embargo, es importante considerar los desafíos potenciales, como el costo inicial del carbono orgánico y la variabilidad de las condiciones de los cultivos, que podrían afectar los resultados en diferentes contextos. Estos hallazgos abren la puerta a prácticas agrícolas más sostenibles y rentables, pero requieren ser evaluados en diferentes condiciones para asegurar su aplicabilidad generalizada.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés en relación con esta investigación, y que todas las contribuciones realizadas al estudio han sido llevadas a cabo de manera objetiva y sin influencias externas que puedan comprometer la integridad de los resultados.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

Conceptualización: P.V.; M.P. Curación de datos: P.V.; C.P. Análisis formal: M.P.; P.V. Investigación: P.V., C.P. Administración del proyecto: M.P.; P.V. Recursos: A.C.; Software: A.C.; C.P. Supervisión: C.P.; P.V. Validación: P.V.; C.P. Visualización: A.C.; M.P. Redacción del borrador original: M.P. Redacción, revisión y edición: M.P.; P.V.; C.P.

VI. REFERENCIAS

- Amlinger, F., Götz, B., Dreher, P., Geszti, J., & Weissteiner, C. (2022). Compost amendment maintains soil structure and carbon storage by increasing available carbon and microbial biomass in agricultural soil – A six-year field study. *Geoderma*, 427(3), 116117. [https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(03\)00026-8](https://doi.org/10.1016/S1164-5563(03)00026-8)
- Araújo, H. F., Leal, P. A. M., Betin, P. S., & Nunes, E. F. (2018). Economic profitability indicators of minitomatoes organic production in greenhouses. *Horticultura Brasileira*, 36(2), 246–252. <https://doi.org/10.1590/s0102-053620180217>
- Brar, B. S., Singh, J., Singh, G., & Kaur, G. (2015). Effects of Long Term Application of Inorganic and Organic Fertilizers on Soil Organic Carbon and Physical Properties in Maize–Wheat Rotation. *Agronomy* 2015, Vol. 5, Pages 220-238, 5(2), 220–238. <https://doi.org/10.3390/agronomy5020220>
- Carolina, Q., Alejandra, A., & Nadine, A. (2023). Evidence of agroecology's contribution to mitigation, adaptation, and resilience under climate variability and change in Latin America. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 48(2), 228–252. <https://doi.org/10.1080/21683565.2023.2273835>
- De Cianni, R., Zanchini, R., De Pascale, A., Lanfranchi, M., Mancuso, T., D'Amico, M., & Di Vita, G. (2024). Determinants influencing the food digestibility perception: A study based on consumer-stated preferences for sweet peppers. *AIMS AGRICULTURE AND FOOD*, 9(1), 30–51. <https://doi.org/10.3934/AGRFOOD.2024003>
- Devi, J., Sagar, V., Kaswan, V., Ranjan, J. K., Kumar, R., Mishra, G. P., Dubey, R. K., & Verma, R. K. (2021). Advances in Breeding Strategies of Bell Pepper (*Capsicum annuum* L. var. *grossum* Sendt.). *Advances in Plant Breeding Strategies: Vegetable Crops: Volume 9: Fruits and Young Shoots*, 3–58. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66961-4_1
- González, P. (2019). Consecuencias ambientales de la aplicación de fertilizantes. Boletín. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Asesoría Técnica Parlamentaria.
- Haghighi, M., Sharifani, M. J., & Parnianifard, F. (2025). Physiological changes of sweet pepper under low irrigation regimes applied in three phenological stages of vegetative growth, reproductive growth, and fruit set. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 53(2), 419–441. <https://doi.org/10.1080/01140671.2023.2171440>
- Hu, N., Liu, C., Chen, Q., Fan, J., Wang, Y., & Sun, H. (2023). Substitution of Chemical Fertilizer with Organic Fertilizer Can Affect Soil Labile Organic Carbon Fractions and Garlic Yield by Mediating Soil Aggregate-Associated Organic Carbon. *Agronomy* 2023, Vol. 13, 13(12). <https://doi.org/10.3390/agronomy13123062>
- Iturrat, M. C. (2020). El agua como catalizador para la paz y seguridad mundial. *Revista de La Facultad de Jurisprudencia.*, 1(7), 180–206. <https://doi.org/10.26807/rfj.v7i7.238>
- Jaborova, D., Ma, H., Bellingrath-Kimura, S. D., & Wirth, S. (2021). Impacts of biochar on basil (*Ocimum basilicum*) growth, root morphological traits, plant biochemical and physiological properties and soil enzymatic activities. *Scientia Horticulturae*, 290, 110518. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110518>
- Jacobsen, S. E., Miranda, A., Chalampunte-Flores, D., Rodríguez, J. P., Osorio, L. R. M., Bonjean, A. P., Kodahl, N., Bastidas, C. T., & Sørensen, M. (2023). Agronomical Characterization of Latin- American Crops. *Latin-American Seeds: Agronomic, Processing and Health Aspects*, 1–52. <https://doi.org/10.1201/9781003088424-1>
- Lal, R. (2020). Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, 112(5), 3265–3277. <https://doi.org/10.1002/agj2.20282>

- Lévesque, Vicky, Thomas Jeanne, Martine Dorais, Noura Ziadi, Richard Hogue, Hani Antoun, Biochars improve tomato and sweet pepper performance and shift bacterial composition in a peat-based growing medium, *Applied Soil Ecology*, Volume 153, 2020, 103579, ISSN 0929-1393, <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103579>.
- Liu, C. A., Li, F. R., Zhou, L. M., Zhang, R. H., Yu-Jia, Lin, S. L., Wang, L. J., Siddique, K. H. M., & Li, F. M. (2013). Effect of organic manure and fertilizer on soil water and crop yields in newly-built terraces with loess soils in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 117, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.002>
- Liu, Y., Lan, X., Hou, H., Ji, J., Liu, X., & Lv, Z. (2024). Multifaceted Ability of Organic Fertilizers to Improve Crop Productivity and Abiotic Stress Tolerance: Review and Perspectives. *Agronomy* 2024, Vol. 14, 14(6). <https://doi.org/10.3390/agronomy14061141>
- Möller, K. (2018). Soil fertility status and nutrient input–output flows of specialised organic cropping systems: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 2018 112:2, 112(2), 147–164. <https://doi.org/10.1007/s10705-018-9946-2>
- Mucheru-Muna, M., Mugendi, D., Pypers, P., Mugwe, J., Kung’U, J., Vanlauwe, B., & Merckx, R. (2014). ENHANCING MAIZE PRODUCTIVITY AND PROFITABILITY USING ORGANIC INPUTS AND MINERAL FERTILIZER IN CENTRAL KENYA SMALL-HOLD FARMS. *Experimental Agriculture*, 50(2), 250–269. <https://doi.org/10.1017/S0014479713000525>
- Müftüoğlu, B., & Başı, S. (2025). Effects of Different Irrigation Regimes and Biochar Applications on Pollen and Anther Development in *Capsicum annuum* Plant. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 94(10), 3217–3229. <https://doi.org/10.32604/phyton.2025.071755>
- Navarro Morillo, I. (2024). *Efectos de la aplicación de CSL en plantas hortícolas para mejorar su crecimiento en diferentes condiciones medioambientales*. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8060500>
- Olatunji, T. L., & Afolayan, A. J. (2018). The suitability of chili pepper (*Capsicum annuum* L.) for alleviating human micronutrient dietary deficiencies: A review. *Food Science and Nutrition*, 6(8), 2239–2251. <https://doi.org/10.1002/fsn3.790>
- Piperno, D. R. (2011). The Origins of Plant Cultivation and Domestication in the New World Tropics. *https://doi.org/10.1086/659998*, 52(SUPPL. 4), 453. <https://doi.org/10.1086/659998>
- Romero-Carrión, V., Ccasani-Allende, J., Rivadeneyra-Rivas, C., & Coayla-Coayla, E. (2026). Synthetic fertilizer application strategies for environmentally responsible food production. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 17(1), 1. <https://doi.org/10.29312/remexca.v17i1.3871>
- Sabogal, D. V. M., ORCID, & 0000-0002-9591-1362. (2025). *Modelación de variables fisiológicas, bioquímicas y genéticas asociadas a condiciones de sequía y salinidad en Capsicum annuum L.* <https://ring.uaq.mx/handle/123456789/11923>
- Shanmugham, V., & Subban, R. (2022). Capsanthin from *Capsicum annuum* fruits exerts anti-glaucoma, antioxidant, anti-inflammatory activity, and corneal pro-inflammatory cytokine gene expression in a benzalkonium chloride-induced rat dry eye model. *Journal of Food Biochemistry*, 46(10), e14352. <https://doi.org/10.1111/jfbc.14352>
- Singh, R., Singh, P., Singh, H., & Raghubanshi, A. S. (2019). Impact of sole and combined application of biochar, organic and chemical fertilizers on wheat crop yield and water productivity in a dry tropical agro-ecosystem. *Biochar* 2019 1:2, 1(2), 229–235. <https://doi.org/10.1007/s42773-019-00013-6>

- Song, X., Razavi, B. S., Ludwig, B., Zamanian, K., Zang, H., Kuzyakov, Y., Dippold, M. A., & Gunina, A. (2020). Combined biochar and nitrogen application stimulates enzyme activity and root plasticity. *Science of The Total Environment*, 735, 139393. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139393>
- Terasemillas (2025). Novedades. El futuro del pimiento en Ecuador. Consultado en línea y disponible en: <https://terrasemillas.com>.
- Xu, G., Wolf, S., & Kafkafi, U. (2001). Interactive effect of nutrient concentration and container volume on flowering, fruiting, and nutrient uptake of sweet pepper. *Journal of Plant Nutrition*, 24(3), 479–501. <https://doi.org/10.1081/PLN-100104974>
- Yan, Z., Cao, X., Bing, L., Song, J., Qi, Y., Han, Q., Yang, Y., & Lin, D. (2024). Responses of Growth, Enzyme Activity, and Flower Bud Differentiation of Pepper Seedlings to Nitrogen Concentration at Different Growth Stages. *Agronomy* 2024, Vol. 14, 14(10). <https://doi.org/10.3390/agronomy14102270>
- Zhang, M., Liu, Y., Wei, Q., Liu, L., Gu, X., Gou, J., & Wang, M. (2023). Chemical Fertilizer Reduction Combined with Biochar Application Ameliorates the Biological Property and Fertilizer Utilization of Pod Pepper. *Agronomy*, 13(6), 1616. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061616>
- Zohoungbogbo, H. P. F., Ganta, J. S. O., Ambali, M., & Barchenger, D. (2025). Recent trends in pepper (*Capsicum* spp.) production and consumption in Sub-Saharan Africa. *Acta Horticulturae*, 1(1422), 89–98. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2025.1422.12>