



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2025,
Volumen 9, Número 4.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2

EVALUACIÓN DE DIFERENTES FUENTES DE CARBONO EN EL SISTEMA RADICULAR EN EL CULTIVO DE BANANO

**EVALUATION OF DIFFERENT CARBON SOURCES IN
THE ROOT SYSTEM OF BANANA CULTIVATION**

Sánchez Benalcázar Evelyn Carolina
Universidad Técnica de Machala, Ecuador

Agurto Paladinez Heiddy Katihuska
Universidad Técnica de Machala, Ecuador

Quevedo Guerrero José Nicasio
Universidad Técnica de Machala, Ecuador

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i3.19086

Evaluación de Diferentes Fuentes de Carbono en el Sistema Radicular en el Cultivo de Banano

Evelyn Carolina Sánchez Benalcázar¹esanchez13@utmachala.edu.ec<https://orcid.org/0000-0002-0973-7135>Universidad Técnica de Machala
Ecuador**Heiddy Katihuska Agurto Paladinez**hagurto1@utmachala.edu.ec<https://orcid.org/0000-0001-5114-0896>Universidad Técnica de Machala
Ecuador**José Nicasio Quevedo Guerrero**jquevedo@utmachala.edu.ec<https://orcid.org/0000-0002-8974-5628>Universidad Técnica de Machala
Ecuador

RESUMEN

El presente estudio evaluó el efecto de diferentes fuentes de carbono sobre el desarrollo del sistema radicular en el cultivo de banano, en condiciones de campo, en la provincia de El Oro, Ecuador. La investigación se llevó a cabo en la finca bananera “Jorge Javier”, utilizando un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con cinco tratamientos: carbón (103 gr/planta + 3 gr/planta *Trichoderma spp.*), humus de lombriz (1003 gr/planta + 3 gr/planta *Trichoderma spp.*), ácidos húmicos (53 gr/planta + 3 gr/planta *Trichoderma spp.*), una mezcla física de los tres (103 gr/planta + 3 gr/planta *Trichoderma spp.*) y un testigo sin aplicación. Las variables analizadas incluyeron peso total de raíces, raíces vivas, enfermas y muertas, así como altura de planta, ancho del fuste, emisión foliar y unidades de clorofila. El análisis estadístico reveló diferencias significativas en variables clave como el peso de raíces vivas, eficiencia fotosintética y ancho del fuste, destacando el tratamiento de humus más *Trichoderma spp.*, y la mezcla física por su efecto positivo sobre el sistema radicular. Los resultados sugieren que el uso de fuentes de carbono orgánico puede fortalecer la salud del suelo, mejorar la estructura vegetal y optimizar la eficiencia fisiológica del cultivo, representando una alternativa sostenible frente al manejo convencional.

Palabras clave: banano, sistema radicular, carbono, fertilidad, sostenibilidad

¹ Autor principal

Correspondencia: hagurto1@utmachala.edu.ec

Evaluation of Different Carbon Sources in the Root System of Banana Cultivation

ABSTRACT

This study evaluated the effect of different carbon sources on root system development in banana crops under field conditions in the province of El Oro, Ecuador. The research was carried out at the “Jorge Javier” banana farm using a randomized complete block design (RCBD) with five treatments: charcoal (103 g/plant + 3 g/plant *Trichoderma* spp.), earthworm castings (1003 g/plant + 3 g/plant *Trichoderma* spp.), humic acids (53 g/plant + 3 g/plant *Trichoderma* spp.), a physical mixture of the three (103 g/plant + 3 g/plant *Trichoderma* spp.), and a control without application. The variables analyzed included total root weight, live, diseased, and dead roots, as well as plant height, stem width, leaf emission, and chlorophyll units. Statistical analysis revealed significant differences in key variables such as live root weight, photosynthetic efficiency, and stem width, with the humus plus *Trichoderma* spp. treatment and physical mixing being particularly effective for their positive effects on the root system. The results suggest that the use of organic carbon sources can strengthen soil health, improve plant structure, and optimize crop physiological efficiency, representing a sustainable alternative to conventional management.

Keywords: banana, root system, carbon, fertility, sustainability

Artículo recibido 05 junio 2025
Aceptado para publicación: 25 julio 2025



INTRODUCCIÓN

El banano representa un cultivo estratégico para la agricultura de los países tropicales, siendo uno de los principales productos de exportación y fuente de ingresos para el Ecuador. En este país, la provincia de El Oro destaca por su amplia trayectoria y volumen de producción, gracias a sus condiciones agroclimáticas favorables. No obstante, el modelo productivo predominante, basado en el uso intensivo de agroquímicos, ha generado serias consecuencias sobre la salud del suelo. La aplicación constante de fertilizantes sintéticos ha derivado en problemas como la acidificación del sustrato, la disminución del contenido de materia orgánica y la pérdida progresiva de diversidad microbiana, aspectos esenciales para el funcionamiento del ecosistema edáfico (Guo et al., 2010; Han et al., 2017).

Particularmente, en las zonas bananeras de El Oro se ha constatado que el uso repetido de herbicidas contribuye a la compactación del suelo, afectando la oxigenación y reduciendo la capacidad de infiltración de agua. Esta condición limita el desarrollo del sistema radicular de las plantas, disminuyendo la absorción de nutrientes y, por ende, su productividad. Asimismo, se ha identificado una notable disminución en la población de microorganismos benéficos del suelo, lo cual debilita el equilibrio biológico y favorece la aparición de enfermedades.

De manera complementaria, estudios internacionales como el de Huo et al. (2025) han demostrado que los fertilizantes líquidos basados en lignina y ácidos húmicos no solo mejoran el desarrollo radicular del banano, sino también incrementan la actividad enzimática del suelo y la disponibilidad de nutrientes, actuando como bioestimulantes naturales.

Ante esta problemática, se han propuesto estrategias más sostenibles orientadas a recuperar la funcionalidad del suelo. Entre ellas, el uso de enmiendas orgánicas como el biocarbón ha ganado relevancia, ya que contribuye a mejorar la estructura física del suelo, estimula la formación de raíces vigorosas y promueve un entorno microbiológico más activo (Tenesaca et al., 2020). Investigaciones recientes han confirmado estos beneficios. Por ejemplo, Jiménez et al. (2019) reportaron un incremento en el volumen y el peso de raíces al aplicar humus líquido; Barrezueta et al. (2024) destacaron un mejor crecimiento vegetal al combinar biocarbón y silicio con fertilización convencional; y Torres et al. (2020) observaron mejoras en la biomasa radicular al emplear mezclas de biocarbón, pasto ensilado y minerales.



En este contexto, la presente investigación tiene como propósito evaluar el efecto de diferentes fuentes de carbono en el desarrollo radicular del banano en El Oro, con el objetivo de promover prácticas agrícolas que contribuyan a la sostenibilidad del sistema productivo y a la restauración de la fertilidad edáfica.

METODOLOGÍA

El estudio se llevó a cabo en la agrícola bananera “*Jorge Javier*”, ubicada en la parroquia Barbones, cantón El Guabo, provincia de El Oro, Ecuador, en las coordenadas geográficas 3°10'52"S 79°52'24"W. La zona presenta un clima tropical, con una temperatura promedio de 26 °C y una altitud de 15 msnm. La finca cuenta con un sistema de producción establecido, basado en el manejo convencional del cultivo, donde se han utilizado históricamente agroquímicos y fertilizantes sintéticos.

Diseño experimental

Se establecieron cuatro combinaciones tales como se muestran en la tabla 1, usándose cinco productos con diferentes dosis. El tipo de plantas establecidas corresponde a prontas. Se llevó a cabo un muestreo aleatorio de 25 plantas en cada uno de los lotes, empleando un diseño de bloques completos al azar (DBCA) para considerar la heterogeneidad de los bloques muestreados. Paralelamente, se recolectaron muestras de suelo al inicio y al final de la investigación (90 días) para determinar el pH, la conductividad eléctrica (C.E.) y el contenido de materia orgánica (M.O.).

Tabla 1. Descripción de los tratamientos

COD	TRATAMIENTOS	DOSIS/ Planta	Dosis kg/ha	Total de plantas
T1	Carbón(100g) + <i>Trichoderma Spp</i> (3g)	103g	144.2	15
T2	Ácidos húmicos (50g) + <i>Trichoderma Spp</i> (3g)	53g	74.2	15
T3	Humus(1kg) + <i>Trichoderma Spp</i> (3g)	1003g	1404.2	15
T4	Mezcla física Ácidos húmicos(20g) + Carbón (40g) + Humus (40g) + <i>Trichoderma Spp</i> (3g)	103g	144.2	15
T5	Testigo	0	0	5

La dosis de *Trichoderma* es de 250g por hectárea.

METODOLOGÍA

La frecuencia de aplicación fue de una vez al mes, realizándose un total de tres aplicaciones a lo largo del ensayo. Por cada tratamiento se seleccionaron 5 plantas al azar en cada lote, para el muestreo se

realizó un ortoedro frente a la planta madre y al hijo a 20 cm de distancia de la base de la planta de 30 cm de largo x 15 cm de ancho y 30 cm de profundidad con un palín universal, se introdujo una pala delimitando un rectángulo con las dimensiones ya propuestas, se extrajo el suelo en conjunto con las raíces en un lugar limpio, se recolectó sólo las raíces en una funda plástica transparente, se etiquetó el número de la muestra y el tratamiento, se transportó todas las muestras a un lugar protegido por el sol, para evitar la desecación, se procedió con la limpieza de las muestras de raíces para lavarlas y eliminar el exceso del suelo, se volvió a colocarlas dentro de las fundas plásticas con sus respectivas etiquetas, para luego realizar el análisis de raíces (Córdova et al., 2022).

Porcentaje de raíces sanas de la primera y última aplicación

Para la evaluación del porcentaje de raíces, se tomó la muestra en campo la cual fue procesada y pesada en una balanza digital para obtener el peso total de la muestra, luego se seleccionaron las raíces de la misma en cuatro parámetros; peso total de raíces (PTR), raíces sanas (PRS), raíces enfermas o infectadas (PRD) y raíces muertas (PRM) luego se las pesó nuevamente por separado, para la obtención del porcentaje de las raíces sanas (PRS) se efectuó el cálculo matemático, de la siguiente manera, $\% PRS = \text{peso raíces sanas (g)} \times 100 / \text{peso total de raíces (g)}$, esto se realizó para cada tratamiento en campo.

Tabla 2. Variables y frecuencia de toma de datos.

Variables evaluadas	Periodicidad de mediciones
Peso total de raíces	90 días
Peso de raíces sanas	90 días
Peso de raíces enfermas	90 días
Peso de raíces muertas	90 días
Altura de planta	Cada 30 días
Fuste de planta	Cada 30 días
Emisión foliar	Cada 30 días
Unidades de clorofila	Cada 30 días

Altura de hijo. Se empleó una cinta métrica para medir desde la base del pseudotallo hasta el punto de bifurcación en forma de "V" de la hoja más reciente.

Fuste del hijo

La medición de la circunferencia del pseudotallo se efectuó a una altura de 40 cm desde el nivel del suelo, tomando como referencia ese punto para registrar la dimensión correspondiente de la planta.

Emisión foliar

La emisión foliar se evaluó mediante un conteo visual realizado mensualmente, registrando el número de hojas presentes hasta la más reciente emitida.

Análisis estadístico

Para procesar los datos se aplicó un ANOVA factorial intergrupos previa comprobación de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas posteriormente se utilizó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey al 5% de significancia con el fin de identificar grupos de medias estadísticamente similares todas las pruebas estadísticas fueron realizadas utilizando el software SPSS versión 25 desarrollado por IBM (IBM, 2022).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir del análisis estadístico, se identificaron diferencias significativas entre lotes y tratamientos para las variables evaluadas.

A continuación, se presentan los resultados detallados por variable, considerando tanto los efectos observados en los diferentes lotes como la comparación con antecedentes científicos relevantes.

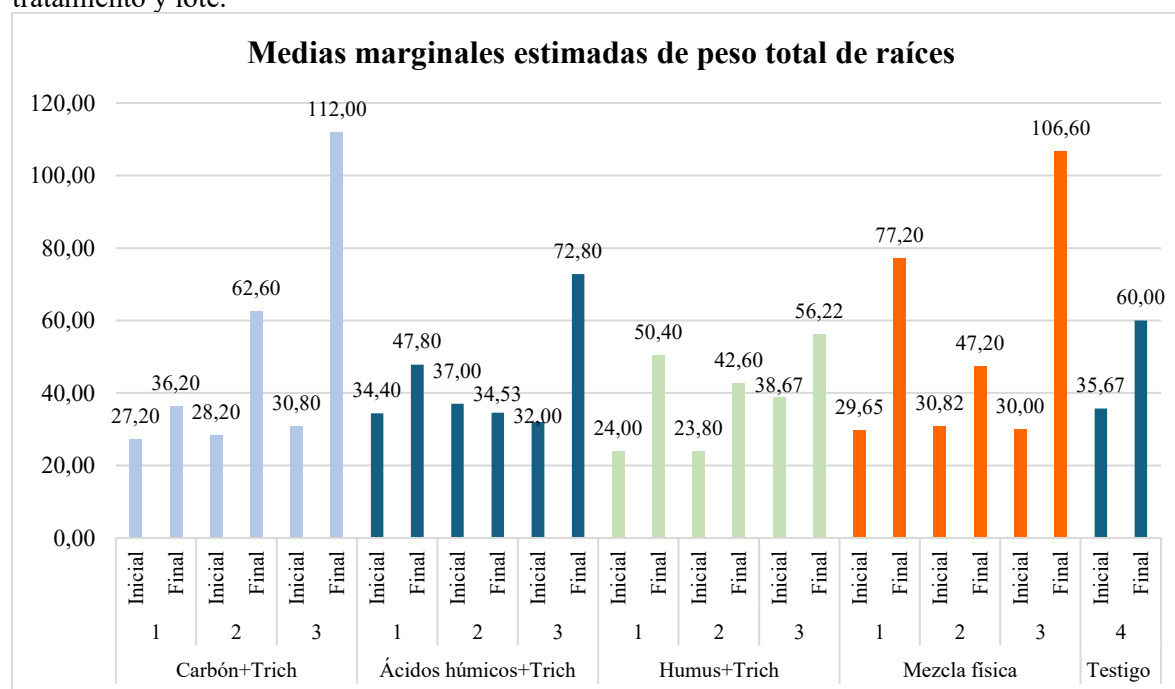
Tabla 3. Resultados del ANOVA factorial intergrupos en las variables morfológicas y raíces con la significancia estadística por lote.

Lote	Tratamientos	Peso total	Raíces vivas	Raíces enfermas	Raíces muertas	Altura	Emisión foliar	Fuste	Unidades de clorofila
1	T1	36.20 ^{ab}	45.16 ^{ab}	34.28 ^{ab}	20.57 ^a	218.20 ^a	0.98 ^a	70.50 ^a	72.30 ^a
	T2	47.80 ^{ab}	46.40 ^{ab}	32.54 ^{ab}	21.07 ^a	214.00 ^a	0.88 ^a	72.11 ^a	73.04 ^a
	T3	50.40 ^{ab}	53.85 ^{ab}	40.84 ^{ab}	5.32 ^a	205.60 ^a	0.94 ^a	69.58 ^a	72.97 ^a
	T4	77.20 ^{ab}	45.23 ^{ab}	35.18 ^{ab}	19.59 ^a	201.00 ^a	0.82 ^a	67.14 ^a	72.89 ^a
2	T1	43.60 ^b	52.07 ^a	30.78 ^b	17.14 ^a	209.00 ^a	0.83 ^{ab}	72.80 ^a	73.33 ^a
	T2	34.60 ^b	51.59 ^a	34.51 ^b	13.90 ^a	236.60 ^a	0.83 ^{ab}	75.35 ^a	72.67 ^a
	T3	42.60 ^b	77.97 ^a	13.65 ^b	8.38 ^a	209.80 ^a	0.85 ^{ab}	69.33 ^a	72.02 ^a
	T4	47.20 ^b	56.94 ^a	33.56 ^b	9.51 ^a	200.20 ^a	0.90 ^{ab}	68.10 ^a	72.33 ^a
3	T1	112.00 ^a	56.00 ^a	31.86 ^b	12.14 ^a	188.20 ^a	0.90 ^a	62.98 ^a	72.49 ^a
	T2	72.80 ^a	66.48 ^a	21.87 ^b	11.65 ^a	214.40 ^a	0.91 ^a	71.66 ^a	72.23 ^a
	T3	64.60 ^a	59.57 ^a	29.62 ^b	10.81 ^a	196.20 ^a	0.98 ^a	67.00 ^a	70.94 ^a
	T4	56.20 ^a	66.42 ^a	22.25 ^b	11.32 ^a	192.40 ^a	0.89 ^a	69.07 ^a	72.18 ^a
4	Testigo	60.00 ^{ab}	39.86 ^b	44.46 ^a	15.68 ^a	206.60 ^a	0.80 ^b	68.13 ^a	72.56 ^a
SIG		0.00	0.00	0.06	0.07	0.17	0.01	0.01	0.61

Los resultados obtenidos en esta investigación (Tabla 3) evidencian que el uso de fuentes orgánicas de carbono genera un efecto significativo sobre el desarrollo del sistema radicular y las variables fisiológicas del cultivo de banano. Específicamente, se observaron diferencias estadísticamente significativas en las variables peso total de raíces, peso de raíces vivas, eficiencia fotosintética y fuste en los tres lotes evaluados lo que confirma que la calidad y el tipo de enmienda orgánica aplicada influyen directamente sobre el comportamiento del cultivo.

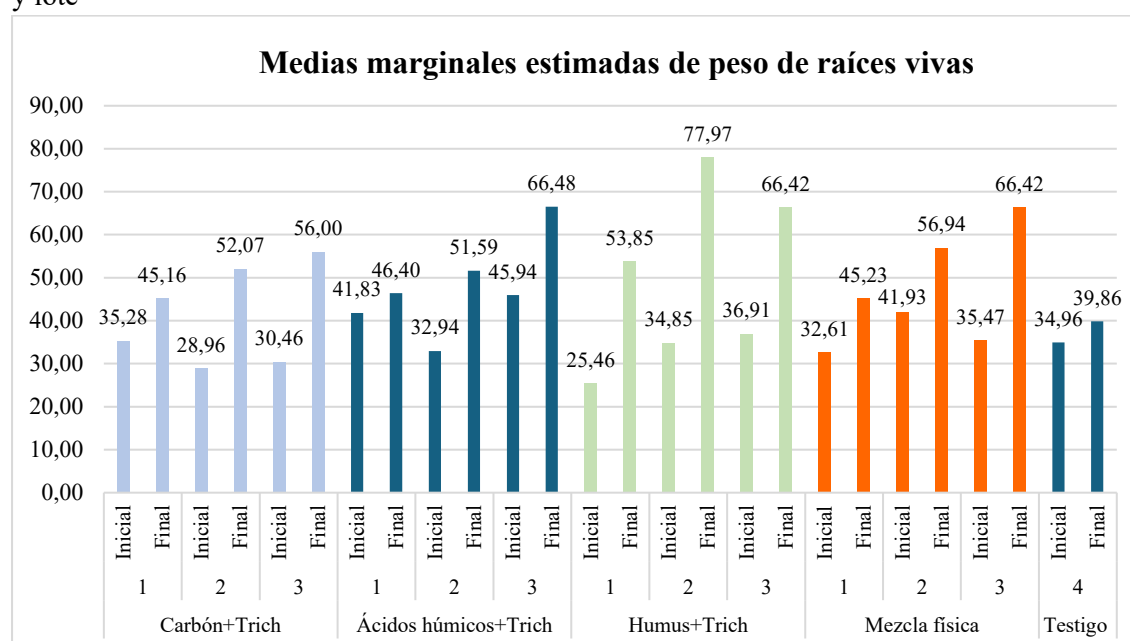
Los resultados más destacados se observaron en los tratamientos con mezcla física (T4) en los lotes 1 (77,20 %) y 2 (47,20 %), así como en el tratamiento con carbón puro (T1), que alcanzó un notable 112,00 % en el lote 3. Estos valores reflejan una posible interacción positiva entre la mejora de la estructura edáfica y el incremento en la disponibilidad de nutrientes, promovida por estos insumos. Estudios previos han evidenciado mecanismos similares; Jiang et al. (2020) reportaron que el uso de compost contribuye a una mayor porosidad del suelo y favorece la proliferación de raíces finas, mientras que Zhang et al. (2020) demostraron que la incorporación conjunta de materia orgánica y magnesio mejora la funcionalidad de la membrana celular y la retención de agua en suelos tropicales, factores que en conjunto promueven una mayor exploración del sistema radicular.

Figura 1. Medias marginales estimadas del peso de raíces totales en plantas de banano según tratamiento y lote.



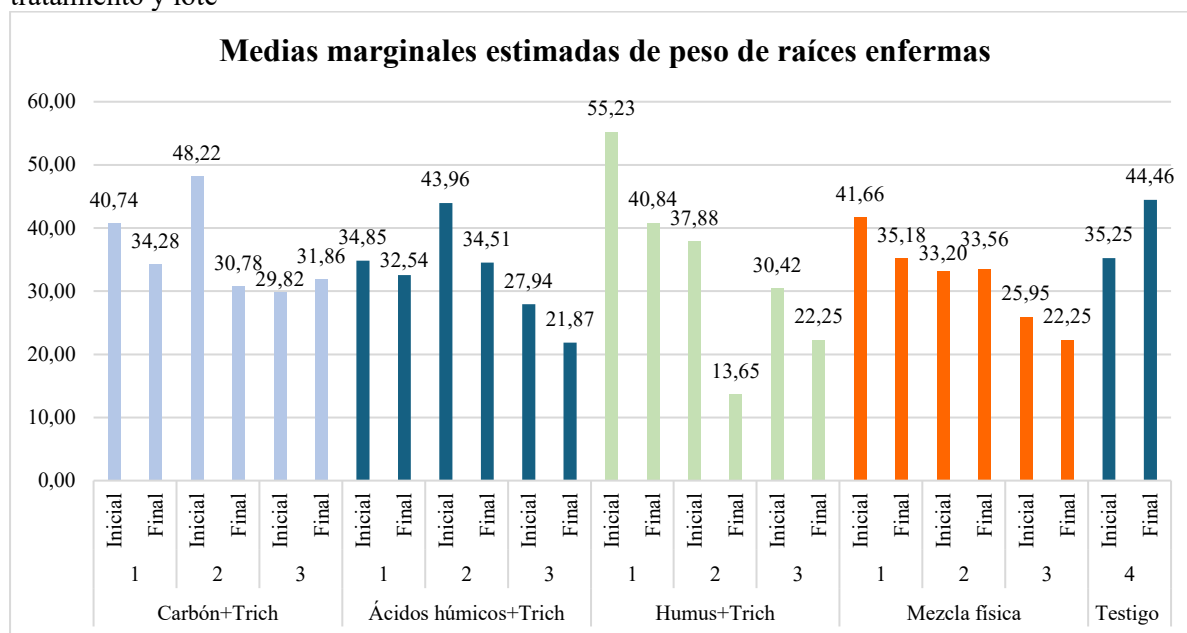
En relación con el peso de raíces vivas, si bien no se detectaron diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,0885$), el tratamiento con humus de lombriz (T3) mostró los valores más elevados en los lotes 1 y 2, con 53,85 % y 77,97 %, respectivamente. En el lote 3, los mayores porcentajes de raíces vivas se observaron en el tratamiento con Levón (T2) y la mezcla física (T4), con registros de 66,48 % y 66,42 %, respectivamente. Esta tendencia es coherente con lo señalado por Cakmak (2013) y Gerendás y Fühns (2013), quienes destacan el rol fisiológico del magnesio en la activación de enzimas antioxidantes y en la estabilización de las membranas celulares, procesos clave para mantener la viabilidad del sistema radicular en escenarios de estrés abiótico.

Figura 2. Medias marginales estimadas del peso de raíces vivas en plantas de banano según tratamiento y lote



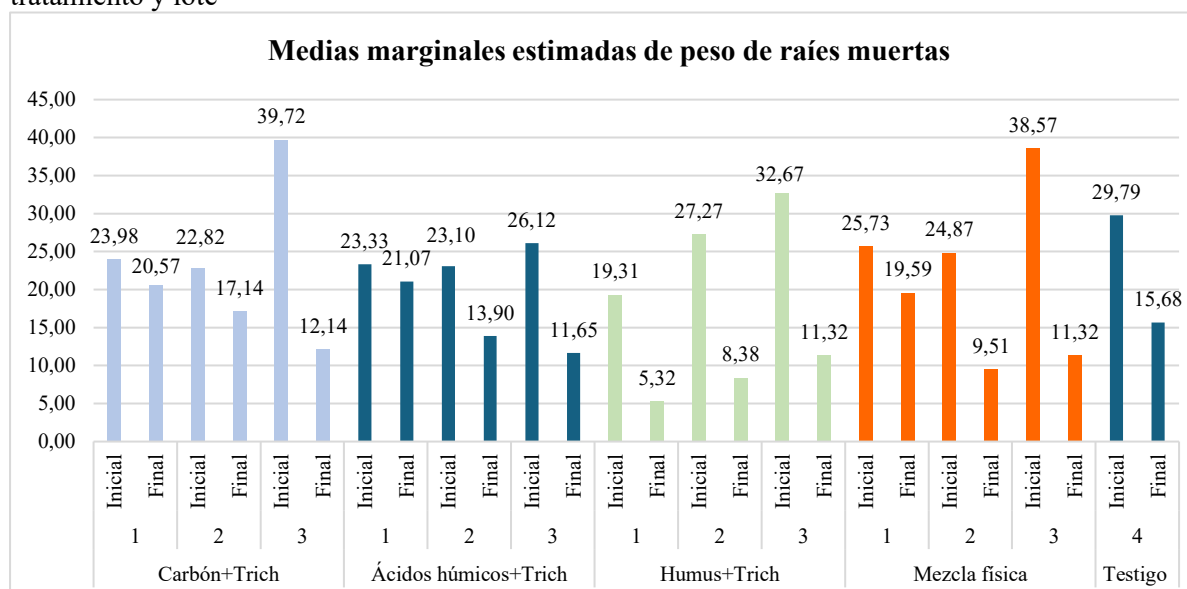
En lo que respecta al porcentaje de raíces enfermas, a pesar de que el análisis estadístico no mostró diferencias significativas ($p = 0,84$), se observó una tendencia en los tratamientos con carbón (T1) y humus de lombriz (T3) a reducir la incidencia de patógenos radiculares en comparación con el control. Esta respuesta podría estar relacionada con la capacidad de las enmiendas orgánicas ricas en carbono para modificar la composición del microbioma rizosférico, promoviendo el establecimiento de comunidades microbianas benéficas. En este sentido, Bonanomi et al. (2018) y Liu et al. (2017) han reportado que tales enmiendas favorecen la proliferación de microorganismos antagonistas que compiten con hongos fitopatógenos, al tiempo que estimulan la producción de compuestos de defensa en las raíces.

Figura 3. Medias marginales estimadas del peso de raíces enfermas en plantas de banano según tratamiento y lote



El análisis del porcentaje de raíces muertas evidenció que el tratamiento con humus de lombriz (T3) fue el más eficaz para reducir la necrosis radicular de forma sostenida en los tres lotes evaluados, registrando 5,32 % en el lote 1, 8,38 % en el lote 2 y 10,81 % en el lote 3. Este efecto puede explicarse por las propiedades del vermicompost, que aporta materia orgánica estable y una diversidad de nutrientes que favorecen la lignificación celular y la acumulación de compuestos fenólicos en la pared celular. Estos procesos fortalecen la estructura radicular y mejoran su resistencia frente al ataque de patógenos y al estrés abiótico (Cakmak, 2013; Gerendás & Fühns, 2013).

Figura 4. Medias marginales estimadas del peso de raíces muertas en plantas de banano según tratamiento y lote



Aunque las variables correspondientes a raíces enfermas, raíces muertas, altura de planta y contenido de clorofila no arrojaron diferencias estadísticamente significativas, se evidenció una tendencia hacia la reducción de la necrosis radicular en los tratamientos con enmiendas orgánicas. Este patrón sugiere un efecto protector potencial sobre el sistema radicular, posiblemente derivado del equilibrio biológico promovido por la incorporación de materia orgánica y la acción de microorganismos beneficiosos en la rizosfera (Bonanomi et al., 2018; Liu et al., 2017).

En conjunto, los hallazgos respaldan que la aplicación de fuentes de carbono orgánico contribuye significativamente al fortalecimiento del sistema radicular, la mejora de la eficiencia fotosintética y el desarrollo estructural de la planta de banano. Sin embargo, los efectos observados varían según la combinación de insumos y las propiedades específicas del suelo en cada lote, lo cual enfatiza la necesidad de implementar estrategias de manejo edáfico diferenciadas, adaptadas tanto a las condiciones del sitio como a los objetivos productivos del sistema agrícola.

Tabla 4. Resultados del ANOVA factorial intergrupos en las variables morfológicas y raíces con el sig por tratamiento.

Lote	Tratamientos	Peso total (%)	Raíces vivas (%)	Raíces enfermas (%)	Raíces muertas (%)	Altura (cm)	Emisión foliar	Fuste (cm)	Unidades de clorofila
1	T1	36.20 ^a	45.16 ^{ab}	34.28 ^{ab}	20.57 ^a	218.20 ^a	0.98 ^a	70.50 ^{ab}	72.30 ^a
	T2	47.80 ^a	46.40 ^{ab}	32.54 ^{ab}	21.07 ^a	214.00 ^a	0.88 ^{ab}	72.11 ^a	73.04 ^a
	T3	50.40 ^a	53.85 ^a	40.84 ^b	5.32 ^a	205.60 ^a	0.94 ^a	69.58 ^{ab}	72.97 ^a
	T4	77.20 ^a	45.23 ^{ab}	35.18 ^{ab}	19.59 ^a	201.00 ^a	0.82 ^{ab}	67.14 ^b	72.89 ^a
2	T1	43.60 ^a	52.07 ^{ab}	30.78 ^{ab}	17.14 ^a	209.00 ^a	0.83 ^a	72.80 ^{ab}	73.33 ^a
	T2	34.60 ^a	51.59 ^{ab}	34.51 ^{ab}	13.90 ^a	236.60 ^a	0.83 ^{ab}	75.35 ^a	72.67 ^a
	T3	42.60 ^a	77.97 ^a	13.65 ^b	8.38 ^a	209.80 ^a	0.85 ^a	69.33 ^{ab}	72.02 ^a
	T4	47.20 ^a	56.94 ^{ab}	33.56 ^{ab}	9.51 ^a	200.20 ^a	0.90 ^{ab}	68.10 ^b	72.33 ^a
3	T1	112.00 ^a	56.00 ^{ab}	31.86 ^{ab}	12.14 ^a	188.20 ^a	0.90 ^a	62.98 ^{ab}	72.49 ^a
	T2	72.80 ^a	66.48 ^{ab}	21.87 ^{ab}	11.65 ^a	214.40 ^a	0.91 ^{ab}	71.66 ^a	72.23 ^a
	T3	64.60 ^a	59.57 ^a	29.62 ^b	10.81 ^a	196.20 ^a	0.98 ^a	67.00 ^{ab}	70.94 ^a
	T4	56.20 ^a	66.42 ^{ab}	22.25 ^{ab}	11.32 ^a	192.40 ^a	0.89 ^{ab}	69.07 ^b	72.18 ^a
4	TESTIGO	60.00	39.86 ^a	44.46 ^a	15.68 ^a	206.60 ^a	0.80 ^b	68.13 ^b	72.56 ^a
	SIG	0,33	0,09	0,84	0,01	0,12	0,15	0,00	0,88

Porcentaje de raíces totales

La variable correspondiente al porcentaje de raíces totales fue analizada mediante la prueba post hoc de Tukey con un nivel de confianza del 95 %, obteniéndose un valor de p de 0,33, superior a 0,05, lo cual indica que no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos y el testigo.

En el Lote 1, el tratamiento con mezcla física (T4) alcanzó el mayor porcentaje de raíces totales (77,20 %), superando al control (60,00 %), mientras que T3 (50,40 %), T2 (47,80 %) y T1 (36,20 %) registraron valores decrecientes. En el Lote 2, ninguno de los tratamientos superó el valor del testigo (60 %); no obstante, T4 obtuvo el porcentaje más alto (47,20 %), seguido de T1 (43,60 %), T3 (42,60 %) y T2 (34,60 %). Estos hallazgos están en línea con lo reportado por Ebrahimi et al. (2021), quienes señalaron que la interacción entre compost y biochar puede favorecer el desarrollo radicular. En cuanto al Lote 3, los tratamientos T1 (112,00 %) y T2 (72,80 %) mostraron un incremento considerable en la densidad radicular en comparación con el testigo (60,00 %), mientras que T3 (64,60 %) presentó un resultado intermedio y solo T4 (56,20 %) se ubicó por debajo del valor de referencia.

Porcentaje de Raíces vivas

Para evaluar el porcentaje de raíces vivas se utilizó la prueba post hoc de Tukey con un nivel de confianza del 95 %. El análisis arrojó un valor de p igual a 0,09, superior al umbral de significancia (0,05), lo cual indica que no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos. En el lote 1, el tratamiento T3 reportó el mayor porcentaje de raíces vivas (53,85 %), mientras que el control presentó el valor más bajo (39,86 %); los tratamientos T1 (45,15 %), T2 (46,39 %) y T4 (45,22 %) mostraron promedios similares entre sí. En el lote 2, T3 mantuvo su desempeño destacado con un 77,96 % de raíces vivas. Estos hallazgos son concordantes con lo indicado por Hassan et al. (2022), quienes demostraron que el vermicompost (fuente análoga al humus de lombriz) incrementa la biomasa y viabilidad de las raíces gracias a su aporte de nutrientes, enzimas y fitohormonas que mitigan el estrés edáfico y estimulan el crecimiento radical. En cambio, en el lote 3, T2 obtuvo el mayor valor (66,48 %), seguido de cerca por T4 (66,42 %), mientras que T1 (56,00 %) y T3 (59,57 %) se ubicaron por debajo.

Porcentaje de raíces enfermas

El análisis del peso de raíces enfermas se realizó utilizando la prueba post hoc de Tukey, con un nivel de confianza del 95 %, obteniéndose un valor de p de 0,84, superior al umbral de significancia (0,05), lo que indica la inexistencia de diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados. En el lote 1, tanto el control (44,46 %) como el tratamiento T3 (40,84 %) registraron los promedios más elevados, mientras que T1 (34,28 %), T2 (32,54 %) y T4 (35,18 %) presentaron valores

más bajos. En el lote 2, T3 reportó el porcentaje más reducido de raíces enfermas (13,65 %), seguido por T1 (30,78 %), T4 (33,55 %) y T2 (34,51 %). Estos resultados están relacionados con lo expuesto por Ebrahimi et al. (2021), quienes destacan que el uso de biochar mejora la estructura del suelo, favoreciendo la porosidad y la aireación, lo cual podría reducir el riesgo de infecciones radiculares al dificultar el establecimiento de patógenos. En cuanto al lote 3, T2 alcanzó la media más baja (21,86 %), con T4 cercano (22,25 %), mientras que T1 (31,86 %) y T3 (29,61 %) mostraron los promedios más altos. En todos los lotes, el testigo mantuvo el mayor valor registrado (44,46 %), evidenciando una tendencia consistente.

Porcentaje de raíces muertas

El porcentaje de raíces muertas fue analizado mediante la prueba post hoc de Tukey con un nivel de confianza del 95 %, obteniéndose un p-valor de 0,01, inferior a 0,05, lo que demuestra la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados. En el lote 1, el tratamiento T3 mostró una notable reducción de la mortalidad radicular, alcanzando apenas un 5,32 %, valor considerablemente menor al observado en el control (15,68 %). En contraste, T2 presentó la cifra más elevada (21,07 %), mientras que T1 (20,57 %) y T4 (19,59 %) se ubicaron en posiciones intermedias. En el lote 2, T3 volvió a destacar con la menor proporción de raíces muertas (8,38 %), seguido por T4 (9,51 %) y T2 (13,90 %); en este caso, T1 (17,14 %) incluso superó al control (15,68 %). Por último, en el lote 3, todas las enmiendas orgánicas basadas en carbono lograron reducir la mortalidad en comparación con el testigo: T3 alcanzó 10,81 %, T2 registró 11,65 %, T4 obtuvo 11,32 % y T1 se situó en 12,14 %. Estos resultados evidencian que, si bien algunos tratamientos como T1 y T2 se aproximan al nivel de referencia, T3 demuestra una eficacia constante en la disminución de la necrosis radicular. Este comportamiento coincide con lo señalado por Hassan et al. (2022), quienes destacan que el vermicompost contiene fitohormonas y enzimas que contribuyen a retardar la senescencia del sistema radicular.

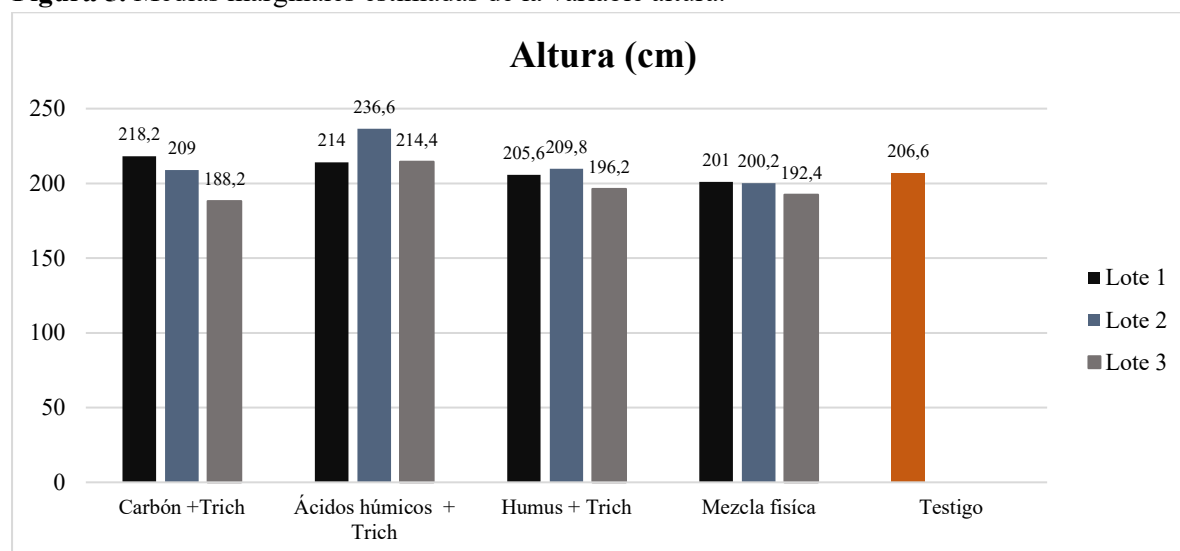
Altura de la planta.

El análisis de la variable altura de planta, mediante la prueba post hoc de Tukey con un nivel de confianza del 95 %, arrojó un p_valor igual a 0,12, superior al umbral de significancia de 0,05. Esto indica que no se presentan diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos y el control.



En el lote 1, el tratamiento T1 registró la mayor altura promedio (218,20 cm), seguido por el control (206,60 cm), T2 (214,00 cm), T3 (205,60 cm) y T4 (201,00 cm), lo cual sugiere una leve superioridad del tratamiento T1 bajo condiciones moderadas. Este resultado concuerda con lo señalado por Ebrahimi et al. (2021), quienes reportan que la aplicación de biocarbón mejora la estructura edáfica y la retención hídrica, favoreciendo el crecimiento en altura del tallo en cultivos hortícolas.

Figura 5. Medias marginales estimadas de la variable altura.



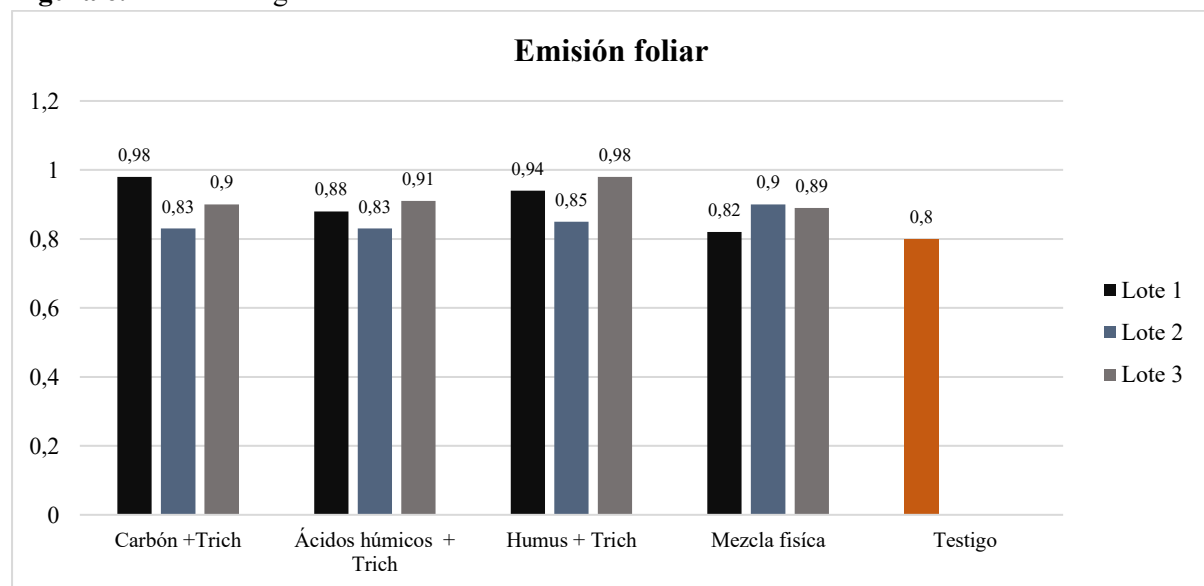
En el lote 2, el tratamiento T2 alcanzó la mayor altura promedio con 236,60 cm, superando notablemente al control (206,60 cm). Por su parte, T1 y T3 presentaron valores similares (209,00 cm y 209,80 cm, respectivamente), mientras que T4 registró la menor altura (200,20 cm). En cambio, en el lote 3, el control ocupó la segunda posición con 206,60 cm, seguido por T3 (196,20 cm), T4 (192,40 cm) y T1 (188,20 cm), siendo nuevamente T2 el tratamiento con mayor altura (214,40 cm). Este comportamiento difiere lo descrito por Hassan et al. (2022), quienes destacan el papel del vermicompost en el suministro de nutrientes y fitohormonas durante la etapa vegetativa. A pesar de que los resultados apuntan a un posible efecto positivo de T1 y T2 en el crecimiento en altura bajo distintas condiciones, la falta de significancia estadística sugiere la necesidad de repetir el ensayo para validar estos efectos de manera concluyente.

Emisión foliar

La variable emisión foliar fue analizada mediante la prueba post hoc de Tukey con un nivel de confianza del 95 %, obteniéndose un p_valor igual a 0,15, superior al umbral de significancia ($p_valor > 0,05$), lo

que indica que no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos y el control. En el lote 1, el tratamiento T1 registró el mayor promedio de emisión foliar (0,98), mientras que el control presentó el valor más bajo (0,80); los tratamientos T3 (0,94), T2 (0,88) y T4 (0,82) mostraron valores intermedios en orden decreciente. En el lote 2, T4 reportó la mayor emisión (0,90), seguido por T3 (0,85), T1 y T2 (ambos con 0,83), manteniéndose el control en el mismo nivel observado anteriormente (0,80).

Figura 6. Medias marginales estimadas de la variable emisión foliar.



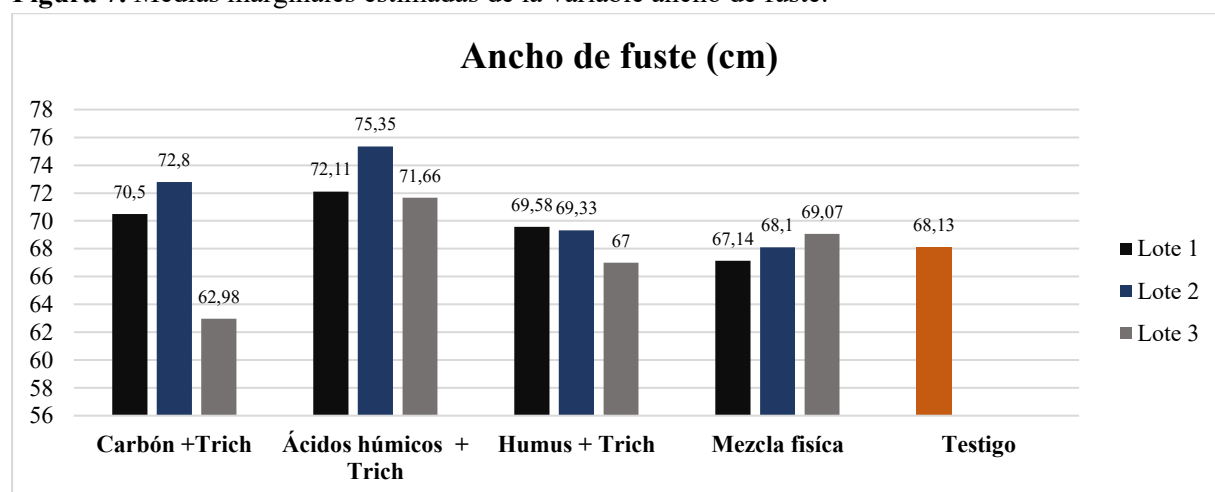
En el lote 3, el tratamiento T3 registró el valor más alto de emisión foliar (0,98), seguido por T2 (0,91) y T1 (0,90), mientras que T4 (0,89) y el control (0,80) mostraron los promedios más bajos. Si bien se evidencian ligeras variaciones entre tratamientos —con T1 y T4 destacándose en los dos primeros lotes y T3 en el tercero—, estos resultados coinciden con lo reportado por Zhang et al. (2020), quienes relacionan la incorporación de materia orgánica con un aumento moderado en el índice de área foliar en cultivos de banano, atribuible a una mayor eficiencia en el aprovechamiento del agua y los nutrientes.

Ancho del fuste

El análisis del ancho del fuste, realizado mediante la prueba post hoc de Tukey con un nivel de confianza del 95 %, arrojó un p_valor igual a 0,002, el cual es inferior a 0,05, indicando la presencia de diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados. En el lote 1, el tratamiento T2 mostró el mayor grosor del fuste (72,11 cm), superando al grupo control (68,13 cm), así como a T1 (70,50 cm), T3 (69,58 cm) y T4 (67,14 cm). Esta misma tendencia se observó en el lote 2, donde T2 registró 75,35

cm, seguido por T1 (72,80 cm), T3 (69,33 cm), T4 (68,10 cm) y nuevamente el control con 68,13 cm. En el caso del lote 3, T2 continuó liderando con 71,66 cm, mientras que T4 (69,07 cm), T3 (67,00 cm), el control (68,13 cm) y T1 (62,98 cm) ocuparon posiciones inferiores. Estos resultados difieren de lo reportado por Hassan et al. (2022), quienes destacan que el vermicompost favorece la expansión celular y el proceso de lignificación en el tallo, incrementando así su diámetro. En contraste, Ebrahimi et al. (2021) señalan que el uso de biocarbón también contribuye al engrosamiento del fuste, aunque mediante mecanismos distintos relacionados con la mejora de las propiedades del suelo.

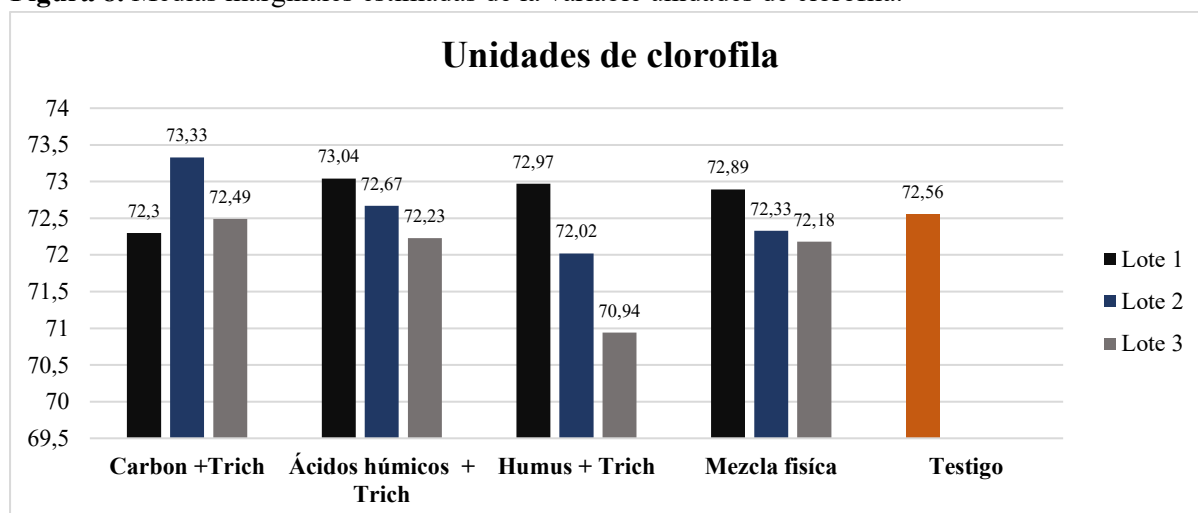
Figura 7. Medias marginales estimadas de la variable ancho de fuste.



Unidades de clorofila

El contenido de clorofila fue evaluado mediante la prueba post hoc de Tukey con un nivel de confianza del 95 %, obteniéndose un valor de p igual a 0,88, superior al umbral de significancia (0,05), lo cual indica que no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos y el control. En el lote 1, el tratamiento T1 registró el valor más bajo (72,30), mientras que T3 y T4 se ubicaron en rangos intermedios, muy próximos al valor del testigo (72,56); en cambio, T2 mostró el contenido más elevado (73,04). En el lote 2, T1 alcanzó el mayor valor (73,33), seguido por el control (72,56), T2 (72,67), T4 (72,33) y T3 (72,02). Finalmente, en el lote 3, el testigo presentó el contenido más alto de clorofila (72,56), seguido por T1 (72,49), T2 (72,23) y T4 (72,18), mientras que T3 obtuvo el valor más bajo (70,94). Estos hallazgos contrastan con lo señalado por Hassan et al. (2022), quienes encontraron que el vermicompost incrementa la disponibilidad de magnesio y otros micronutrientes necesarios para la biosíntesis de clorofila en plantas de banano.

Figura 8. Medias marginales estimadas de la variable unidades de clorofila.



CONCLUSIÓN

En conjunto, los resultados indican que la fuente de carbono ejerce un efecto diferenciado sobre el sistema radicular del banano. Aunque la producción total de raíces y la proporción de raíces vivas no mostraron diferencias estadísticamente significativas ($p_{\text{valor}} > 0,05$), el tratamiento con Humus (T3) tendió a incrementar el porcentaje de raíces vivas en dos de los tres lotes y, de manera consistente, redujo de forma muy marcada la mortalidad radicular ($p = 0,01$), situándose por debajo del 11 % en todos los escenarios frente al 15,7 % del testigo. Por su parte, la mezcla física de carbón, humus de lombriz y ácidos húmicos (T4) mostró tendencias positivas en el porcentaje de raíces total y moderó la incidencia de raíces enfermas. Ácidos húmicos (T2) aportó un engrosamiento del fuste y mantuvo uniformidad en unidades de clorofila, mientras que el carbón (T1) mejoró ligeramente la emisión foliar y la proliferación radicular en ciertos lotes. Estos hallazgos respaldan la idoneidad de combinar fuentes orgánicas y fisicoquímicas de carbono para optimizar la salud y la funcionalidad del sistema radicular en banano, con humus como principal candidato para minimizar la necrosis y preservar la viabilidad de la raíz.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Barrezueta Unda, S., Domingue, C., & Añazco Loaiza, H. (2024). Impacto de la fertilización con biocarbón y SiO_2 en el desarrollo del banano. *Manglar*, 21(1), 87–93.

<http://dx.doi.org/10.57188/manglar.2024.009>

- Bonanomi, G., Lorito, M., Vinale, F., & Woo, S. L. (2018). Organic amendments, beneficial microbes, and soil microbiota: Toward a unified framework for disease suppression. *Annual Review of Phytopathology*, 56, 1–20. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080615-100046>
- Cakmak, I. (2013). Magnesium in crop production, food quality and human health. *Plant and Soil*, 368, 1–4. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-013-1781-2>
- Córdova Girón, Y. A., Quevedo Guerrero, J. N., Cervantes Alava, A. R. (2022). Evaluación de Estimulantes Radiculares en el Cultivo de Banano (*Musa x Paradisiaca*). *Revista Científica Agroecosistemas*, 10(2), 148-157. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/565>.
- Ebrahimi, M., Souiri, M. K., Mousavi, A., & Sahebani, N. (2021). Biochar and vermicompost improve growth and physiological traits of eggplant (*Solanum melongena* L.) under deficit irrigation. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8, Article 19. <https://doi.org/10.1186/s40538-021-00216-9>
- Galecio-Julca, M., León-Huamán, K. L., & Aguilar-Ancota, R. (2020). Effect of organic sources and efficient microorganisms on the yield of the organic banana crop (*Musa* spp. L.). *Manglar*, 17(4), 301–306. <https://revistas.untumbes.edu.pe/index.php/manglar/article/view/195>
- Gerendás, J., & Führs, H. (2013). The significance of magnesium for crop quality. *Plant and Soil*, 368, 101–128. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1555-2>
- Guo, J. H., Liu, X. J., Zhang, Y., Shen, J. L., Han, W. X., Zhang, W. F., ... Zhang, F. S. (2010). Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 327(5968), 1008–1010. <https://doi.org/10.1126/science.1182570>
- Han, J., Shi, J., Zeng, L., Xu, J., & Wu, L. (2017). Impacts of continuous excessive fertilization on soil potential nitrification activity and nitrifying microbial community dynamics in greenhouse system. *Journal of Soils and Sediments*, 17(2), 471–480. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1525-z>
- Hassan, S. A. M., Taha, R. A., Zaied, N. S. M., Essad, E. M., & Abu-El-Reash, G. M. (2022). Effect of vermicompost on vegetative growth and mineral content of acclimated banana plants. *Heliyon*, 8, e10914. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10914>



- Huo, P., Mo, X., Zhang, L., & Sun, S. (2025). Uncovering banana growth and soil biochemical properties transformation after lignin-based liquid compound fertilizer. *Industrial Crops and Products*, 225, 120456. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120456>
- IBM. (2022). One-way ANOVA post hoc tests. IBM Documentation. <https://www.ibm.com/docs/es/spss-statistics/30.0.0>
- Jiang, J., Pan, H., Zhang, Q., Chen, L., Zhang, X., & Chen, W. (2020). Effects of compost on root morphology and soil microbial communities in banana. *Agronomy*, 10(8), 1110. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081110>
- Jiménez Esparza, L., Decker Campuzano, F., González Parra, M., & Mera Andrade, R. (2019). Abonos orgánicos: una alternativa en el desarrollo de cormos de orito (*Musa acuminata* AA). *Dialnet*, 7(1), 54–62. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7882131>
- Liu, H., Xiong, W., Zhang, R., Hang, X., Wang, D., Li, R., ... Shen, Q. (2017). Continuous application of different organic additives can suppress tomato disease by inducing the healthy rhizospheric microbiota. *Plant and Soil*, 423, 229–240. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3484-z>
- Tenesaca, S., Quevedo, J., & García, R. (2019). Determinación de la dosis óptima de biocarbón como enmienda edáfica en el cultivo de banano (*Musa × paradisiaca* clon Williams). *Revista Científica Agroecosistemas*, 137. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/328/346>
- Torres, P., Segura, R., Sandoval, J., & Ortega, R. (2020). Manejo de la sanidad radical del cultivo del plátano mediante rizoestimulantes microbianos, enmiendas orgánicas y minerales. *Nota Técnica*, 45(65), 83–92. https://www.researchgate.net/publication/346927551_MANEJO_DE_LA_SANIDAD_RADICAL_DEL_CULTIVO_DEL_BANANO_MEDIANTE_RIZOESTIMULANTES_MICROBIANOS_ENMIENDAS_ORGANICAS_Y_MINERALES_Relacion_Suelo-Planta_Nota_Tecnica
- Zhang, J., Li, B., Zhang, J., Christie, P., & Li, X. (2020). Organic fertilizer application and Mg fertilizer promote banana yield and quality in an Udic Ferralsol. *PLOS ONE*, 15(3), e0230593. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230593>

