

Residuos de la industria azucarera transformados en fertilizante orgánico: efecto de diferentes dosis en el crecimiento y rendimiento de la zanahoria (*Daucus carota* L.)

Sugar industry waste transformed into organic fertilizer: effect of different doses on carrot (*Daucus carota* L.) growth and yield

María Magdalena Busto Saldivar^{1,2*}, María Jazmín Duarte Caballero², Marcos Fabian Sanabria Franco³, Francisco Vallejos Mernes¹ y Carlos Alcides Villalba Algarin^{3,4}

¹ Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria, Centro de Investigación Hernando Bertoni, Departamento de Suelos. Caacupé, Paraguay.

² Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, Unidad Pedagógica Caacupé. Caacupé, Paraguay.

³ Universidade São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, Brasil.

⁴ Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria, Centro de Investigación Capitán Miranda, Departamento de Suelos. Capitán Miranda, Paraguay.

*Autor para correspondencia:

maria.busto@ipta.gov.py

Conflictos de interés:

No existe ningún tipo de conflicto a declarar

Contribución de autores:

Conceptualización: MMBS. Curación de datos: MMBS, MJDD. Análisis formal: MMBS, MJDC, FVM, CAVA y MFSF. Investigación: MMBS, MJDD, FVM. Metodología: MMBS, MJDC, FVM. Administración del proyecto: MMBS y MJDC. Recursos: MMBS. Supervisión: MJDC. Validación: MMBS. Redacción – borrador original: MMBS, CAVA y MFSF. Redacción – revisión y edición: CAVA y MFSF.

Financiamiento:

Este estudio no recibió ningún tipo de financiamiento.

Historial:

Recibido: 17-05-2025;

Aceptado: 01-08-2025;

Publicado: 11-09-2025

Disponibilidad de datos: Todo el conjunto de datos que apoya los resultados de este estudio está disponible mediante solicitud al autor de correspondencia. El conjunto de datos no está públicamente disponible debido al proyecto seguir recolectando datos de periodos y épocas distintas.

Responsible Editor:

Arnaldo Esquivel-Fariña
Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, Paraguay.

License:

Article published in open access under a Creative Commons CC-BY 4.0 license.

RESUMEN

La zanahoria es un alimento rico en compuestos bioactivos esenciales para la nutrición humana. Por ser un cultivo de ciclo corto, presenta una alta demanda nutricional que comúnmente se satisface mediante el uso intensivo de fertilizantes químicos, los cuales elevan los costos de producción y deterioran la salud del suelo. Como alternativa sustentable, surge la valorización de residuos orgánicos para la producción de fertilizantes. El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto de diferentes dosis de fertilizante orgánico compostado, derivado de subproductos azucareros, sobre el crecimiento y rendimiento del cultivo de zanahoria. El experimento se realizó en el campo experimental del Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria (IPTA) en Caacupé, Paraguay, utilizando la variedad Shin Kuroda bajo un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones por tratamiento. Los tratamientos consistieron en cuatro dosis crecientes del fertilizante orgánico (2, 4, 6 y 8 t ha⁻¹) y un tratamiento testigo sin fertilización. Se evaluaron altura de planta, longitud y diámetro de raíz, peso de raíz y rendimiento total. Los datos se analizaron mediante análisis de varianza ($p < 0,05$). Los resultados mostraron que la altura de planta, peso de raíces y rendimiento no fueron significativamente influenciados por las dosis de fertilizante orgánico aplicadas. Sin embargo, se observaron diferencias significativas en el diámetro y longitud de la raíz. Se concluye que las dosis de fertilizante orgánico evaluadas no fueron suficientes para satisfacer completamente las demandas nutricionales del cultivo de zanahoria.

Palabras clave: enmiendas orgánicas, economía circular, horticultura sostenible, nutrición de plantas.

ABSTRACT

Carrot is a food source rich in bioactive compounds essential for human nutrition. Being a short-cycle crop, it has high nutritional demands that are commonly satisfied through intensive use of chemical fertilizers, which increase production costs and deteriorate soil health. As a sustainable alternative, the valorization of organic waste for fertilizer production emerges. The objective of this work was to evaluate the effect of different doses of composted organic fertilizer, derived from sugar byproducts, on carrot crop growth and yield. The experiment was conducted at the experimental field of the Paraguayan Institute of Agricultural Technology (IPTA) in Caacupé, Paraguay, using the Shin Kuroda variety under a randomized complete block design with three replications per treatment. Treatments consisted of four increasing doses of organic fertilizer (2, 4, 6, and 8 t ha⁻¹) and a control treatment without fertilization. Plant height, root length and diameter, root weight, and total yield were evaluated. Data were analyzed using analysis of variance ($p < 0.05$). Results showed that plant height, root weight, and yield were not significantly influenced by the applied organic fertilizer doses. However, significant differences were observed in root diameter and length. It is concluded that the evaluated organic fertilizer doses were not sufficient to completely satisfy the nutritional demands of the carrot crop.

Keywords: organic amendments, circular economy, sustainable horticulture, plant nutrition.

INTRODUCCIÓN

La zanahoria (*Daucus carota* L.) es una de las hortalizas

más consumidas a nivel mundial debido a su alto valor nutracéutico proporcionado por carotenoides, fibras, vitaminas y minerales que poseen elevada capacidad

antioxidante y generan importantes beneficios para la seguridad alimentaria (Martínez-Saldarriaga, Henao-Rojas, Flórez-Martínez, Cadena-Chamorro, y Yepes-Betancur, 2025; Que et al., 2019). Sin embargo, al ser un cultivo de ciclo corto, exige altas demandas de nutrientes para sostener un desarrollo óptimo en términos de crecimiento, rendimiento y calidad (Hailu, Hassen, Hussien, Belete y Alemu, 2024; Oleszkiewicz et al., 2025). Para satisfacer estas exigencias, los fertilizantes químicos han sido utilizados de manera intensiva durante las últimas décadas (Mitsigiorgi et al., 2024). Aunque la aplicación de estos insumos ha incrementado los rendimientos de las cosechas (Anduaem, Kemal, Mekonen, Yenet y Kassa, 2025), su uso excesivo ha generado elevados costos para los productores y ha desencadenado serios problemas en el agroecosistema (Urta, Alkorta, Mijangos y Garbisu, 2020; Wu et al., 2025).

El uso excesivo de insumos químicos conduce a la acidificación del suelo, la pérdida de carbono orgánico y biodiversidad microbiana, y la alteración de los ciclos de nutrientes a través de procesos como la volatilización, lixiviación y erosión (De Carolis et al., 2024; Mitsigiorgi et al., 2024; Windisch et al., 2020). Estas alteraciones no solo afectan la calidad del suelo, sino que también repercuten en los recursos hídricos y atmosféricos, contribuyendo a la eutrofización y al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que pone en riesgo el equilibrio ecológico global (Villalba Algarin, 2025). Ante estos desafíos, surge la necesidad de explorar alternativas de manejo nutricional que mitiguen estos efectos adversos, promoviendo una producción hortícola más sostenible y en armonía con el entorno natural.

El uso de residuos agroindustriales como fertilizantes orgánicos ha ganado relevancia como una alternativa viable para restaurar la salud del suelo, promover el crecimiento vegetal y mitigar los impactos ambientales (Maomao et al., 2023; Urta et al., 2020). Esta estrategia, alineada con los principios de la economía circular, facilita la reutilización de subproductos de industrias como la azucarera, que generan grandes volúmenes de bagazo rico en materia orgánica y nutrientes esenciales (Gálvez Torres, Legua Cárdenas, Cruz Nieto, Caro Soto y Inga Sotelo, 2019; García-Ramos, Quirós-Roque y Rosales-Mendoza, 2022; Velasco-Velasco, Gomez-Merino, Hernández-Cázares, Salinas-Ruiz y Guerrero-Peña, 2017).

El compostaje, un tratamiento aeróbico, presenta ventajas significativas al requerir menos tiempo para la bioconversión de desechos orgánicos en biofertilizante, con menores costos operativos y un proceso relativamente simple (Srivastava y Chakma, 2023). Este tratamiento transforma los desechos en enmiendas que liberan nutrientes de manera gradual, promueve un suministro balanceado para los cultivos y optimiza la eficiencia nutricional del suelo (Velasco-Velasco et al., 2017; Yagüe y Lobo, 2024). Además, su uso disminuye la dependencia de fertilizantes sintéticos, mejora la rentabilidad agrícola y contribuye a la sostenibilidad ambiental (LI et al., 2017; Wang, Zhu, Zhang y Wang, 2018; Parađiković et al., 2019).

Estudios recientes han demostrado que los fertilizantes

orgánicos mejoran significativamente el desempeño agronómico de los cultivos, debido al incremento en los niveles de carbono orgánico y al enriquecimiento del suelo con macro y micronutrientes esenciales, al tiempo que estimulan la diversidad microbiana (Chen et al., 2023; Dao et al., 2020; El-Mogy et al., 2020; Pinter et al., 2019; Urta et al., 2020; Windisch et al., 2021). Además, estos insumos fortalecen la estructura física del suelo, mejoran la capacidad de retención de agua y favorecen un entorno más estable para el sistema radicular (Chae et al., 2024; Duan et al., 2023). Las plantas con mayor crecimiento radicular logran explorar los recursos ambientales en las capas más profundas del suelo (Villalba Algarin, González, Szostak y Sanabria Franco, 2024a), lo que finalmente se traduce en una mejor morfología y rendimiento de las plantas (Fernandes et al., 2024; Krzyżak et al., 2024; Yagüe & Lobo, 2024).

Los fertilizantes orgánicos derivados de residuos de la industria azucarera han mostrado resultados prometedores en diversos cultivos hortícolas y agrícolas (Gálvez Torres et al., 2019; Matheus, 2004). Sin embargo, aún se dispone de datos limitados sobre su desempeño en las condiciones agroambientales y productivas de Paraguay, particularmente en cultivos como la zanahoria. Esta brecha en el conocimiento restringe su adopción como alternativa viable para una fertilización más sustentable en los sistemas productivos locales y limita el aprovechamiento de estos subproductos como enmiendas orgánicas.

Con base en estas premisas, se planteó la hipótesis de que los residuos de la industria azucarera, convertidos en fertilizantes orgánicos mediante compostaje, mejoran tanto el crecimiento como el rendimiento de la zanahoria, con efectos más marcados a medida que se incrementan las dosis aplicadas. Para verificar esta hipótesis, se diseñó un experimento de campo cuyo objetivo fue evaluar el efecto de distintas dosis de fertilizante orgánico compostado, derivado de subproductos azucareros, sobre el crecimiento y rendimiento del cultivo de la zanahoria.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área experimental

El experimento se condujo de julio a noviembre de 2021 en la parcela experimental del Programa de Investigación de Hortalizas (PIH), ubicada en el Centro de Investigación Hernando Bertoni (CIHB-IPTA), de la Ciudad de Caacupé, Paraguay (25°23'16.38" S, 57°11'22.24" O). Los datos meteorológicos del periodo fueron obtenidos de la estación meteorológica del CIHB-IPTA, registrándose temperaturas mínimas y máximas de 16,7 °C y 29,2 °C, respectivamente, con una precipitación total acumulada de 534 mm, cuyas variaciones mensuales se presentan en la Figura 1. El suelo del área experimental se clasifica como Arenic Kandiodult, caracterizado por un color pardo rojizo oscuro (López Gorostiaga et al., 1995), y sus propiedades químicas iniciales, determinadas antes de la instalación del experimento, se detallan en la Tabla 1.

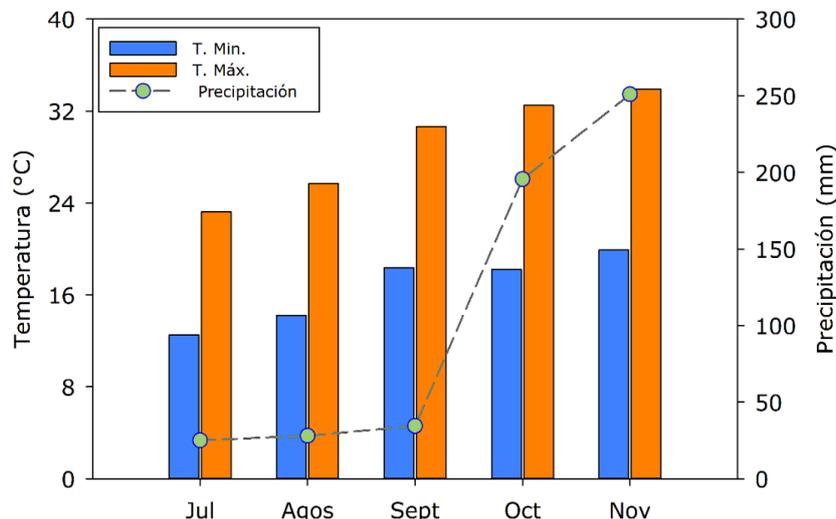


Figura 1. Comportamiento climático mensual (temperatura mínima, máxima y precipitación) durante el período experimental en el Centro de Investigación Hernando Bertoni del Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria, Caacupé, Paraguay, 2021.

Tabla 1. Características químicas del suelo en el área experimental antes del inicio del experimento

Profundidad	pH	MOS	P	Al ³⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺
cm		%	mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³		
0-20	6,40	0,82	30,87	0,0	2,86	0,33	0,03

Nota: pH (H₂O); MOS (Walkley-Black modificado); P y K⁺ (Mehlich); Al³⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺ (KCl 1 mol·L⁻¹)

Obtención y caracterización del fertilizante orgánico

El fertilizante orgánico utilizado en este estudio fue obtenido en la Cooperativa Manduvira Ltda., ubicada en la ciudad de Arroyos y Esteros (Figura 2). Esta cooperativa produce fertilizantes orgánicos a partir de residuos sólidos derivados del procesamiento de caña de azúcar, mediante un proceso de compostaje sin el uso de insumos químicos. Las materias primas incluyen torta de filtro (58%), bagazo de caña de azúcar (5%), ceniza (10%), proteína vegetal (10%), minerales (1%), estiércol vacuno (6%), estiércol de ave (1%) e inoculantes ecológicos descomponedores en líquido (9%).

El compostaje se realiza en pilas verticales con inoculación de microorganismos nativos y control de temperatura (<70 °C), pH y humedad (20-30%), utilizando volteo mecánico para asegurar una adecuada aireación hasta alcanzar la madurez del material. En la etapa final, se añaden microorganismos benéficos para mejorar la calidad biológica del compost. El resultado es un producto estable y biológicamente activo, listo para su uso agrícola. Las principales características nutricionales del compost indican que posee 7,45 g/100 g de carbono orgánico, 4,4 g/100 g de nitrógeno, 0,4 g/100 g de fósforo, 0,3 g/100 g de potasio, 1,7 g/100 g de calcio y 0,47 g/100 g de magnesio. La caracterización química del fertilizante orgánico se

realizó mediante análisis rutina en el laboratorio en el Centro de Investigación Hernando Bertoni del Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria, Caacupé, Paraguay.

Tratamientos y diseño experimental

En este estudio se evaluaron cinco tratamientos que consistieron en cuatro dosis de fertilizante orgánico compostado a partir de residuos de la industria azucarera y un tratamiento testigo sin fertilización. Los niveles evaluados fueron: F0 (control, sin fertilización), F1 (2 t ha⁻¹), F2 (4 t ha⁻¹), F3 (6 t ha⁻¹) y F4 (8 t ha⁻¹).

El diseño experimental se organizó bajo un esquema de bloques completos al azar con tres repeticiones por tratamiento, lo que resultó en un total de 15 parcelas experimentales. Cada parcela experimental de 1,2 x 1,2 m contenía cuatro hileras separadas 0,25 m entre sí y 0,08 m entre plantas, correspondiendo a un total de 48 plantas por parcela y 720 plantas en todo el experimento. Como área útil se consideraron las dos hileras centrales con una superficie de 0,816 m², descartándose las hileras laterales y 0,16 m en las cabeceras debido al efecto borde (Figura 2).

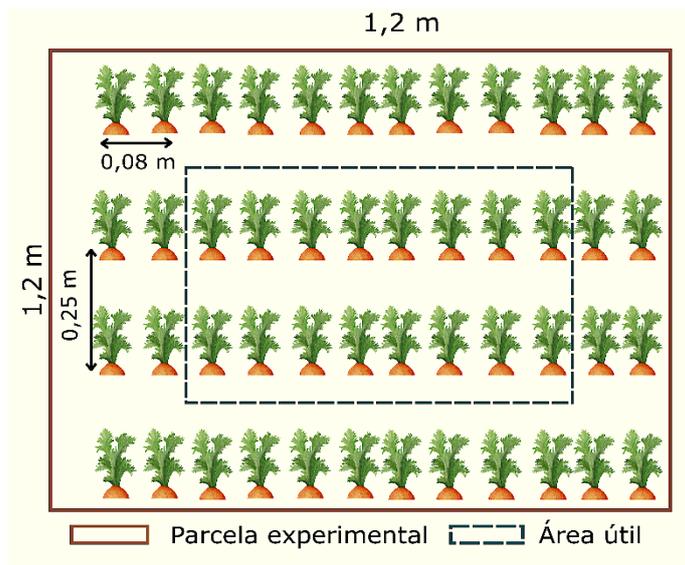


Figura 2. Plano esquemático de la parcela experimental, con dimensiones y distancias entre hileras y plantas, en él se resalta el área útil. Caacupé, Paraguay, 2021.

Métodos de establecimiento y evaluación del cultivo

El muestreo y análisis de suelo se realizaron a principios de julio de 2021. Quince días antes de la siembra, el suelo fue preparado con la ayuda de un motocultor y se formaron tablones de 20 cm de altura. A continuación, se aplicó e incorporó con rastrillo la dosis de fertilizante orgánico compostado, previamente pesada según los tratamientos asignados. Posteriormente, se instaló el sistema de riego por goteo.

La siembra de zanahoria, variedad *Shin Kuroda*, se efectuó a finales de julio. Los surcos se abrieron con un escardillo y se depositaron las semillas manualmente a 1 cm de profundidad. A los 30 días después de la siembra (DDS), se realizó el raleo, dejando las poblaciones de plantas según lo descrito en el ítem anterior. Durante todo el ciclo del cultivo se realizaron monitoreos periódicos para asegurar condiciones óptimas de riego y limpieza. No se aplicaron productos fitosanitarios en ninguna fase del cultivo.

La altura de planta (cm) fue medida en tres momentos después de la siembra (30, 60 y 110, respectivamente). Para ello, se seleccionaron al azar seis plantas del área útil de cada parcela. La altura se midió desde el nivel del suelo hasta el ápice de la parte aérea utilizando una cinta métrica.

La cosecha se realizó inmediatamente después de la última evaluación de altura de planta (110 DDS). En esta etapa, se seleccionaron al azar seis raíces del área útil, y se midieron las siguientes variables: longitud de raíz (cm), determinada desde la base del cuello hasta la extremidad distal más larga; diámetro de la raíz (cm), medido a 2 cm por debajo del cuello con un calibrador pie de rey; peso de la raíz (g), tras el lavado de las raíces para eliminar residuos de suelo y su secado al aire, se pesaron en una balanza digital de precisión; y rendimiento (kg m^{-2}), calculado a partir del peso promedio de las raíces obtenidas en cada

tratamiento, extrapolado mediante la multiplicación del peso promedio por la densidad poblacional establecida en el experimento.

Análisis estadísticos

Los datos fueron procesados utilizando el software R (R Core Team, 2020). La normalidad de los residuos se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Una vez confirmado este supuesto, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar el efecto de los tratamientos sobre las variables de crecimiento y rendimiento de zanahoria. Cuando se identificaron diferencias significativas ($p \leq 0,05$), se compararon las medias de los tratamientos mediante la prueba de Duncan al mismo nivel de significancia. Además, para las variables significativas, se realizó análisis de regresión correspondiente a las dosis evaluadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto del fertilizante orgánico sobre los parámetros de crecimiento de zanahoria

La altura de las plantas de zanahoria medida en tres etapas del ciclo de crecimiento se presenta en la Tabla 2. A pesar de que la dosis más alta presentó alturas hasta 17% superiores a los 30 DDS, 16% a los 60 DDS y 13% a los 110 DDS en comparación con los demás tratamientos, el incremento vegetativo fue estadísticamente similar para todos los tratamientos y etapas de evaluación. Estos resultados contrastan con los de Hailu et al. (2024), quienes reportaron un incremento significativo en la altura de las plantas de zanahoria con la aplicación de vermicompost, pero coinciden con los de Chillo Yupanqui, Peñafiel Rodríguez y Aruquipa Condori (2024), que no observaron diferencias significativas con fertilizantes a base de gallinaza.

Tabla 2. Altura de plantas de zanahoria a los 30, 60 y 110 días después de la siembra (DDS) bajo diferentes dosis de fertilizante orgánico compostado elaborado a partir de desechos de la industria azucarera.

Tratamientos	Altura de plantas (cm)		
	30 DDS	60 DDS	110 DDS
F0	5,1 ^{NS}	23,8 ^{NS}	41,2 ^{NS}
F1	5,3	24,8	40,7
F2	4,8	23,0	37,3
F3	5,4	23,6	40,5
F4	5,6	26,7	42,3
<i>p valor</i>	0,73	0,59	0,75
CV%	16,08	14,11	12,85

NS: diferencia no significativa entre tratamientos por el test de Duncan ($p \leq 0,05$). CV: coeficiente de variación.

La limitada respuesta en el crecimiento observada en este estudio podría atribuirse a las bajas dosis de compost aplicadas, las cuales fueron insuficientes para satisfacer completamente las necesidades nutricionales del cultivo, especialmente en términos de nitrógeno (N) y potasio (K). Aunque el compost utilizado contenía cantidades considerables de estos nutrientes, las concentraciones presentes en el suelo fueron relativamente bajas, particularmente para el K (Tabla 1). Este macronutriente es fundamental para diversas funciones bioquímicas en las plantas y es conocido por mejorar la calidad de los productos hortícolas al participar en procesos como el metabolismo enzimático y la síntesis de compuestos de defensa (Sustr, Soukup y Tylova, 2019).

Además, la liberación lenta del N en el compost pudo haber restringido su disponibilidad inmediata, limitando el crecimiento de la parte aérea del cultivo, que es crucial para sostener altos niveles de fotosíntesis y acumular reservas para el desarrollo radicular, impactando directamente sobre el rendimiento final (Guan, Zhang y Chu, 2025; Mishra, Levengood, Fan y Zhang, 2024; Zhou et al., 2022). Esto sugiere que, además de aumentar las dosis aplicadas, podría ser necesario enriquecer el compost con fuentes de rápida liberación de N y K o combinarlo con fertilizantes minerales para optimizar la disponibilidad de estos nutrientes en suelos degradados y satisfacer las demandas del cultivo de manera más efectiva.

Influencia del fertilizante orgánico sobre parámetros de rendimiento del cultivo

La longitud y el diámetro de la raíz aumentaron significativamente con las dosis de fertilizante orgánico aplicadas ($p < 0,05$). En cuanto a la longitud, el tratamiento con la mayor dosis (F4) mostró incrementos de hasta 24,7% en comparación con el control (F0), lo que refleja el impacto positivo de las concentraciones más altas en esta variable (Figura 3a). Esta tendencia fue confirmada por el análisis de regresión, que mostró una asociación lineal significativa entre la dosis aplicada y la longitud de la raíz ($y = 12,418 + 0,313x$; $R^2 = 0,73$; Figura 3b). Al analizar la ecuación, se observa que por cada tonelada de

fertilizante orgánico aplicada, la longitud de la raíz aumenta en promedio 0,313 cm, siendo la dosis responsable de explicar 73% de la variación observada.

De manera similar, el diámetro de raíz también aumentó con las dosis más altas, siendo F4 el tratamiento con mayores incrementos: 34,9% respecto al control y 15,3% en comparación con F1 (Figura 3c). Esta relación positiva fue respaldada por el análisis de regresión, que mostró un ajuste lineal fuerte ($y = 2,590 + 0,104x$; $R^2 = 0,89$; Figura 3d). Al interpretar la ecuación, se observa que el diámetro de las zanahorias aumentó en promedio 0,104 cm por cada tonelada de fertilizante aplicado, y que 89% de la variación observada en esta variable se explica por la dosis utilizada.

Ambos parámetros evaluados sugieren que se requieren dosis más elevadas para alcanzar el punto óptimo en la curva de respuesta, lo que resalta la necesidad de realizar estudios locales en suelos degradados para maximizar el potencial agronómico del cultivo. Estos resultados son consistentes con investigaciones previas que han demostrado efectos positivos de los fertilizantes orgánicos en el desarrollo radicular del cultivo. Por ejemplo, Hailu et al., (2024) reportaron incrementos de 63% en la longitud y 146% en el diámetro de raíz de zanahoria con 3 t ha⁻¹ de vermicompost, mientras que Zerga Heterat & Tsegaye (2019) observaron aumentos de 118% en el diámetro con 75 t ha⁻¹ de compost. Estos hallazgos respaldan la capacidad de los fertilizantes orgánicos derivados de residuos sólidos para mejorar significativamente la estructura radicular.

Tanto la longitud como el diámetro de la raíz son parámetros críticos para la calidad comercial y el soporte de las plantas de zanahoria (Chillo Yupanqui et al., 2024; Hailu et al., 2024). El efecto positivo observado con las dosis crecientes de fertilizante orgánico puede estar relacionado con el aporte gradual de nutrientes esenciales (Oyege y Balaji Bhaskar, 2023). Además, la incorporación de materia orgánica pudo haber mejorado parcialmente la estructura del suelo (Villalba Algarin, 2025), aumentando

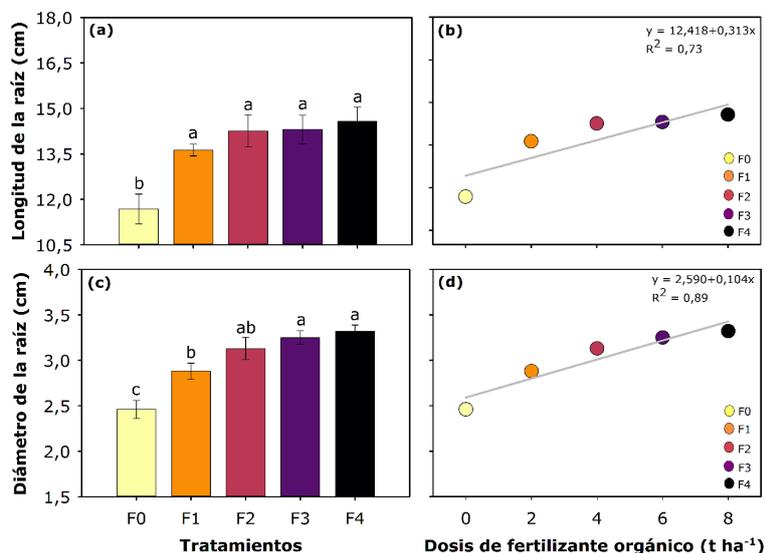


Figura 3. Longitud de raíz (a-b) y diámetro de raíz (c-d) bajo diferentes dosis de fertilizante orgánico compostado elaborado a partir de desechos de la industria azucarera. F0 (control, sin fertilización), F1 (2 t ha⁻¹), F2 (4 t ha⁻¹), F3 (6 t ha⁻¹) y F4 (8 t ha⁻¹). Las líneas verticales sobre las barras indican error estándar de las medias (n = 3). Letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos por el test de Duncan ($p \leq 0,05$).

la retención de humedad y la aireación, condiciones que favorecen el desarrollo radicular y facilitan la obtención de nutrientes en capas más profundas del perfil del suelo (Salman et al., 2023; Tavali, 2020; Villalba Algarin, Ramírez Paniagua, Sanabria Franco y da Silva, 2024b). Estos beneficios quizás, promovieron un crecimiento más eficiente de las raíces en los tratamientos con dosis crecientes de fertilizante orgánico.

Aunque los aumentos en la longitud y el diámetro de la raíz no se reflejaron de manera significativa en el peso de la raíz y el rendimiento, ambas variables mostraron una respuesta lineal positiva con las dosis crecientes de fertilizante (Figura 4). El análisis de regresión mostró que, incluso en las dosis más altas, el rendimiento y el peso de la raíz continuaron aumentando de manera proporcional (Figura 4b, d), lo que confirma que las dosis aplicadas no saturaron el potencial de respuesta del cultivo. Esto sugiere que el cultivo podría seguir respondiendo positivamente a aplicaciones más altas, posiblemente porque los umbrales críticos para maximizar la productividad aún no fueron alcanzados. Esta tendencia es coherente con la liberación gradual de nutrientes característica de los fertilizantes orgánicos, que puede requerir aplicaciones más altas para sostener incrementos significativos en biomasa y rendimiento, especialmente en cultivos de ciclos relativamente cortos (Bonanomi, Lorito, Vinale y Woo, 2018).

Al analizar el peso de las raíces se observó que el peso más bajo se registró en F0 (46,6 g), mientras que F4 alcanzó el valor más alto con 59,3 g (Figura 4a). Al interpretar la ecuación de regresión, se observa una respuesta lineal donde por cada tonelada de fertilizante orgánico aplicado hay un aumento de 1,386 g en el peso de las raíces (Figura 4b). Aunque no representa estadísticamente una

diferencia significativa entre las medias, podría sugerir que las cantidades aplicadas de fertilizante orgánico no han sido suficientes para cubrir completamente las demandas nutricionales del cultivo y activar plenamente su capacidad productiva.

Asimismo, al analizar el rendimiento de las raíces se observó que el valor más bajo fue obtenido en el tratamiento control (F0 = 2,23 kg m⁻²) y alcanzó su punto máximo en F4 (2,85 kg m⁻²) (Figura 4c). Esta respuesta lineal fue respaldada por el análisis de regresión, que mostró que por cada tonelada de fertilizante aplicado el aumento en el rendimiento fue de 0,066 kg por metro cuadrado ($y = 2,366 + 0,066x$; $R^2 = 0,79$; Figura 4d).

Estos resultados contrastan parcialmente con los reportados en estudios previos que encontraron incrementos estadísticamente significativos en el rendimiento de raíces con el uso de fertilizantes orgánicos. Por ejemplo, Hailu et al. (2024) y Zerga Heterat y Tsegaye (2019) documentaron mejoras sustanciales en esas variables con las mayores dosis aplicadas. Aunque aquí se observó un aumento gradual con las dosis estudiadas, las condiciones degradadas del suelo condicionaron las respuestas agronómicas del cultivo.

El uso de fertilizantes orgánicos en la producción de hortalizas ha mostrado resultados mixtos. Algunos estudios reportaron efectos positivos en la productividad de los cultivos y en la calidad del suelo, mientras que otros encontraron efectos limitados. Por ejemplo, Núñez Sosa, Liriano González y López Ceballos (2005) observaron que la eficiencia de enmiendas orgánicas puede aumentar cuando los niveles de materia orgánica en el suelo son más bajos.

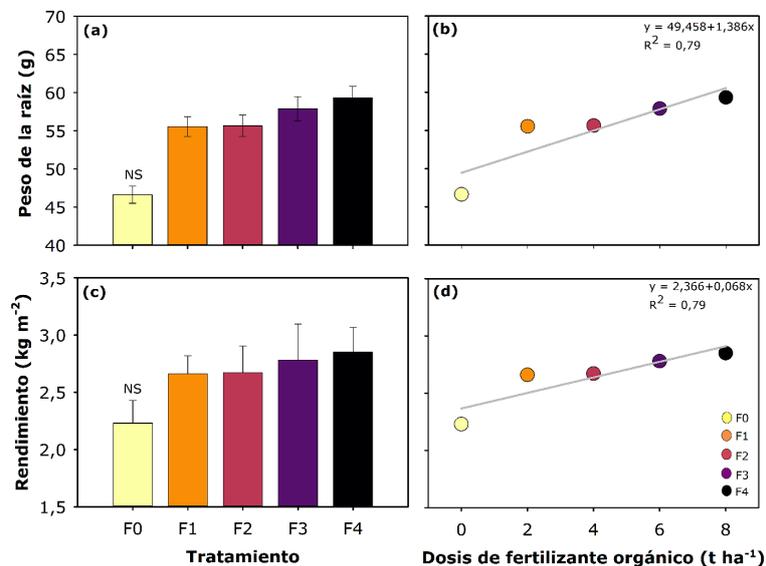


Figura 4. Peso de raíz (a-b) y rendimiento (c-d) de zanahoria bajo diferentes dosis de fertilizante orgánico compostado elaborado a partir de desechos de la industria azucarera. F0 (control, sin fertilización), F1 (2 t ha⁻¹), F2 (4 t ha⁻¹), F3 (6 t ha⁻¹) y F4 (8 t ha⁻¹). Las líneas verticales sobre las barras indican error estándar de las medias (n = 4). NS: diferencia no significativa entre tratamientos por el test de Duncan ($p \leq 0,05$).

De manera similar, Juárez-Rodríguez, Hidalgo-Moreno, Hernández-López, Padilla Cuevas y Etchevers (2024) encontraron que los fertilizantes orgánicos mejoraron o mantuvieron la fertilidad del suelo y aumentaron la productividad comercial de hortalizas, aunque estos efectos parecen depender de la disponibilidad inicial de nutrientes y las características específicas del suelo.

Las condiciones originales del suelo donde se desarrolló este estudio son desafiantes. Como todo suelo altamente intemperizado de la región, presentan limitaciones de fertilidad (Tabla 1), característica normalmente observada en las fincas paraguayas, especialmente en los sistemas de agricultura familiar que frecuentemente se enfrentan a recursos, insumos e implementos limitados, además de escaso conocimiento sobre buenas prácticas agrícolas (Derpsch, Lange, Birbaumer y Moriya, 2016). Esto representa un desafío significativo para restaurar la salud del suelo y cerrar las brechas de producción.

En ese contexto, los resultados de este estudio revelaron hallazgos prometedores: los fertilizantes orgánicos derivados de residuos sólidos de la industria azucarera mostraron un claro potencial para mejorar la producción de zanahoria, respaldado por la respuesta lineal positiva en todas las variables evaluadas con el aumento de las dosis aplicadas. Esta tendencia sugiere que, con estrategias de manejo más adecuadas, estos fertilizantes pueden ofrecer beneficios sustanciales tanto económicos como ambientales para los productores y el país.

Con base en estos resultados, se sugiere que futuras investigaciones evalúen la respuesta de los cultivos a dosis más altas, considerando especialmente la disponibilidad de nutrientes en el suelo y los requerimientos específicos

de las plantas. Esto es fundamental para garantizar que las aplicaciones sean precisas y efectivas, maximizando los beneficios del fertilizante. Además, podrían explorarse combinaciones con fuentes de rápida liberación o el uso de aditivos que aceleren la mineralización del compost, promoviendo una absorción más eficiente de nutrientes y un mayor rendimiento. Estos enfoques podrían optimizar el uso de fertilizantes orgánicos derivados de residuos sólidos y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

CONCLUSIONES

El uso de residuos de la industria azucarera convertidos en fertilizantes orgánicos mediante compostaje favorece el desarrollo radicular de zanahoria (longitud y diámetro). No obstante, en las condiciones del área experimental, las dosis utilizadas no influyen sobre los parámetros de altura, peso y rendimiento de zanahoria.

Además del uso de residuos orgánicos, en suelos altamente intemperizados se requieren estrategias que sincronicen la liberación de nutrientes con las demandas del cultivo. Estas estrategias pueden mejorar la eficiencia del uso de fertilizantes orgánicos derivados de residuos de la industria azucarera y contribuir a sistemas agrícolas más sostenibles y productivos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andualem, A. M., Kemal, Y. O., Mekonen, D. A., Yenet, F. A., & Kassa, H. W. (2025). Data on effect of NPSB fertilizer rates on growth and yield of carrot (*Daucus carota* L.) varieties in Gondar district, Northwestern Ethiopia, *Data in Brief*, 58, 111232. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.111232>
- Bonomi, 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>
- Chae, H. G., Margenot, A. J., Jeon, J. R., Kim, M. S., Jang, K.-S., Yoon, H. Y., Kim, P. J., & Lee, J. G. (2024). Linking the humification of organic amendments with size aggregate distribution: Insights into molecular composition using FT-ICR-MS. *Science of the Total Environment*, 927, 172147. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172147>
- Chen, J., Li, J., Yang, X., Wang, C., Zhao, L., Zhang, P., Zhang, H., Wang, Y., & Li, C. (2023). The Effects of Biochar-Based Organic Fertilizer and Mineral Fertilizer on Soil Quality, Beet Yield, and Sugar Yield. *Agronomy*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/agronomy13092423>
- Chillo Yupanqui, C. P., Peñafiel Rodríguez, W., & Aruquipa Condori, R. (2024). Comportamiento productivo de dos variedades de zanahoria (*Daucus carota* L.) con diferentes niveles de abono orgánico en el Centro Experimental Cota Cota. *Cibum Scientia*, 3(1), pp. 90–98. <https://doi.org/10.53287/oug5529as70g>
- Dao, A., Alvar Beltan, J., Gnanda, A., Guira, A., Nebie, L., & SanouJacob. (2020). Effect of different planting techniques and sowing density rates on the development of quinoa. *African Journal of Agricultural Research*, 16(9), pp. 1325–1333. <https://doi.org/10.5897/ajar2020.14904>
- De Carolis, C., Iori, V., Narciso, A., Gentile, D., Casentini, B., Pietrini, F., Grenni, P., Barra Caracciolo, A., & Iannelli, M. A. (2024). The Effects of Different Combinations of Cattle Organic Soil Amendments and Copper on Lettuce (cv. Rufus) Plant Growth. *Environments - MDPI*, 11(7), 134. <https://doi.org/10.3390/environments11070134>
- Derpsch, R., Lange, D., Birbaumer, G., & Moriya, K. (2016). Why do medium- and large-scale farmers succeed practicing CA and small-scale farmers often do not? – experiences from Paraguay. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 14(3), pp. 269–281. <https://doi.org/10.1080/14735903.2015.1095974>
- Duan, C., Li, J., Zhang, B., Wu, S., Fan, J., Feng, H., He, J., & Siddique, K. H. M. (2023). Effect of bio-organic fertilizer derived from agricultural waste resources on soil properties and winter wheat (*Triticum aestivum* L.) yield in semi-humid drought-prone regions. *Agricultural Water Management*, 289, 108539. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108539>
- El-Mogy, M. M., Abdelaziz, S. M., Mahmoud, A. W. M., Elsayed, T. R., Abdel-Kader, N. H., & Mohamed, M. I. A. (2020). Comparative Effects of Different Organic and Inorganic Fertilisers on Soil Fertility, Plant Growth, Soil Microbial Community, and Storage Ability of Lettuce. *Agriculture (Pol'nohospodarstvo)*, 66(3), pp. 87–107. <https://doi.org/10.2478/agri-2020-0009>
- Fernandes, P., Pinto, R., Correia, C., Mourão, I., Moura, L., & Brito, L. M. (2024). Impact of Kiwifruit Waste Compost on Soil Bacteriome and Lettuce Growth. *Agriculture (Switzerland)*, 14(8), 1409. <https://doi.org/10.3390/agriculture14081409>
- Gálvez Torres, E., Legua Cárdenas, J., Cruz Nieto, D., Caro Soto, F., & Inga Sotelo, M. I. (2019). Evaluación de Abono Orgánico de Vinaza y Bagazo de la Caña de Azúcar para la producción ecológica de rabanito (*Raphanus sativus* L.). *Aporte Santiaguino*, 12(2), pp. 214–227. Disponible en: http://revistas.unasam.edu.pe/index.php/AS_V10N2/article/view/172
- García-Ramos, C. M., Quirós-Roque, V. A., & Rosales-Mendoza, L. E. (2022). Los residuos generados en la producción de la industria azucarera en los últimos 25 años. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 8(16), 1979–1991. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v8i16.15041>
- Guan, C., Zhang, D., & Chu, C. (2025). Interplay of light and nitrogen for plant growth and development. *The Crop Journal*, 13 (3), pp. 641–655. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2025.01.005>
- Hailu, F., Hassen, S., Hussen, S., Belete, E., & Alemu, T. (2024). Evaluation of different fertilizer sources for sustainable carrot production in Tehuledere district, northern Ethiopia. *Heliyon*, 10(8), e29693. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29693>
- Juárez-Rodríguez, L., Hidalgo-Moreno, C. I., Hernández-López, F., Padilla Cuevas, J. & Etchevers, J. D. (2024). Manejo sustentable del suelo para producción de verduras orgánicas en el Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15 (6), p. 1–11. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i6.3395>
- Krzyżak, J., Rusinowski, S., Szada-Borzyszkowska, A., Pogrzeba, M., Stec, R., Janota, P., Lipowska, B., Stec, K., Długosz, J., & Sitko, K. (2024). A novel agrosinters support growth, photosynthetic efficiency and reduce trace metal elements accumulation in oilseed rape growing on metalliferous soil. *Environmental Pollution*, 363, 125095. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125095>
- LI, H., Feng, W-ting, HE, X. hua, ZHU, P., GAO, H. jun, SUN, N., & XU, M. gang. (2017). Chemical fertilizers could be completely replaced by manure to maintain high maize yield and soil organic carbon (SOC) when SOC reaches a threshold in the Northeast China Plain. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(4), pp. 937–946. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61559-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61559-9)
- López Gorostiaga, O., González Erico, E., Llamas G., P. A., Molinas M., A. S., Franco S., E. S., García, S., y Rios, E. (1995). *Estudio de reconocimiento de suelos. Capacidad de uso de la tierra y propuesta de ordenamiento territorial preliminar de la región oriental del Paraguay*. Asunción: Ministerio de Agricultura y Ganadería, 246 p.
- Maomao, H., Songyan, T., Qinyuan, Z., Jingnan, C., Ying, X., Qiu, J., & Fenglin, Z. (2023). Long-term fermented organic fertilizer application reduce urea nitrogen-15 loss from plastic shed agricultural soils. *Annals of Agricultural Sciences*, 68(2), pp. 108–117. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.aos.2023.11.002>
- Martínez-Saldarriaga, J., Henao-Rojas, J. C., Flórez-Martínez, D. H., Cadena-Chamorro, E. M., & Yepes-Betancur, D. P. (2025). Methodological framework for supporting phytochemical bioprospecting re-search: A case study on carrot (*Daucus carota* L.) crop by-products. *Heliyon*, 11(3), e41822 Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41822>
- Matheus L., J. E. (2004). *Evaluación agronómica del uso de compost de residuos de la industria azucarera (biofertilizante) en el cultivo de maíz (Zea mays L.)*. *Bioagro*, 16(3), pp. 219–224.
- Mishra, S., Levengood, H., Fan, J., & Zhang, C. (2024). Plants Under Stress: Exploring Physiological and Molecular Responses to Nitrogen and Phosphorus Deficiency. *Plants*, 13(22), 3144. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/plants13223144>
- Mitsigiorgi, K., Ntroupogianni, G. C., Katsifas, E. A., Hatzinikolaou, D. G., Chassapis, K., Skampa, E.,

- Stefi, A. L., & Christodoulakis, N. S. (2024). Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Cultures and the Bioactivity of Their Root Microflora Are Affected by Amended Soil. *Plants*, *13*(13), pp. 1872. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/plants13131872>
- Núñez Sosa, S. D. B., Liriano González, G. R., y López Ceballos, C. C. (2005). Evaluación de biofertilizantes (Azospirillum y Micorrizas) y diferentes niveles de materia orgánica en bolsa y organóponico, en el cultivo de la zanahoria (*Daucus carota* L.). *Revista Centro Agrícola*, *32*(2), pp. 5–10.
- Oleszkiewicz, T., Sala-Cholewa, K., Godel-Jędrychowska, K., Kurczynska, E., KostECKA-Gugała, A., Petryszak, P., & Baranski, R. (2025). Nitrogen availability modulates carotene biosynthesis, chromoplast biogenesis, and cell wall composition in carrot callus. *Plant Cell Reports*, *44*(2), 31. <https://doi.org/10.1007/s00299-024-03420-7>
- Oyege, I., & Balaji Bhaskar, M. S. (2023). Effects of Vermicompost on Soil and Plant Health and Promoting Sustainable Agriculture. *Soil Systems*, *7*(4), 101 <https://doi.org/10.3390/soilsystems7040101>
- Pinter, I. F., Fernández, A. S., Martínez, L. E., Riera, N., Fernández, M., Aguado, G. D., & Uliarte, E. M. (2019). Exhausted grape marc and organic residues composting with polyethylene cover: Process and quality evaluation as plant substrate. *Journal of Environmental Management*, *246*, pp. 695–705. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.027>
- Parađković, N., Teklić, T., Zeljković, S., Lisjak, M., & Špoljarević, M. (2019). Biostimulants research in some horticultural plant species—A review. *Food and Energy Security*, *8*(2), 1–17. <https://doi.org/10.1002/fes3.162>
- Que, F., Hou, X. L., Wang, G. L., Xu, Z. S., Tan, G. F., Li, T., Wang, Y. H., Khadr, A., & Xiong, A. S. (2019). Advances in research on the carrot, an important root vegetable in the Apiaceae family. *Horticulture Research*, *6*(1), 69. <https://doi.org/10.1038/s41438-019-0150-6>
- Salman, M., Inamullah, Jamal, A., Mihoub, A., Saeed, M. F., Radicetti, E., Ahmad, I., Naeem, A., Ullah, J., & Pampana, S. (2023). Composting Sugarcane Filter Mud with Different Sources Differently Benefits Sweet Maize. *Agronomy*, *13*(3), 748. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030748>
- Srivastava, A. N., & Chakma, S. (2023). Assessment of in situ stabilization and heavy metal toxicity reduction of sugar mill pressmud through pilot scale composting. *Environmental Monitoring and Assessment*, *195*(8), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11564-4>
- Sustr, M., Soukup, A., & Tylova, E. (2019). Potassium in Root Growth and Development. *Plants (Basel, Switzerland)*, *8*(10), 435. <https://doi.org/10.3390/plants8100435>
- Tavali, I. E. (2020). Short-term effect of compost amendment on the fertility of calcareous soil and basil growth. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *52*(2), pp. 172–182. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1854292>
- Urra, J., Alkorta, I., Mijangos, I., & Garbisu, C. (2020). Commercial and farm fermented liquid organic amendments to improve soil quality and lettuce yield. *Journal of Environmental Management*, *264*, 110422. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110422>
- Velasco-Velasco, J., Gomez-Merino, F.C., Hernández-Cázares, J., Salinas-Ruiz, J., R., y Guerrero-Peña, A. (2017). Residuos orgánicos de la agroindustria azucarera: Retos y Oportunidades. *AGROProductividad*, *10*(11), pp. 99–104.
- Villalba Algarin, C. A. (2025). Avanzando hacia una agricultura climáticamente inteligente: el papel del carbono orgánico en las funciones del suelo, los servicios ecosistémicos y la sostenibilidad de agroecosistemas. *Investigacion Agraria*, *27*(1), e2701825. <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2025.2701825>
- Villalba Algarin, C. A., González, A. C., Szostak, J. E. y Sanabria Franco, M. F. (2024a). Explorando el estado del arte de la labranza y su impacto en la calidad del suelo y la productividad agrícola: una revisión crítica de los últimos 20 años. *Investigación Agraria*, *26*(2), pp. 111–124. <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2024.diciembre.2602806>
- Villalba Algarin, C. A., Ramírez Paniagua, I. R., Sanabria Franco, M. F., y da Silva, C. D. (2024b). Comportamiento agronómico bajo diferentes densidades de siembra del sésamo negro (*Sesamum indicum* L.) en la Región Sur del Paraguay. *Investigación Agraria*, *26*(1), pp. 22–28. <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2024.junio.2601768>
- Wang, Y., Zhu, Y., Zhang, S., & Wang, Y. (2018). What could promote farmers to replace chemical fertilizers with organic fertilizers? *Journal of Cleaner Production*, *199*, pp. 882–890. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.222>
- Windisch, S., Sommermann, L., Babin, D., Chowdhury, S. P., Grosch, R., Moradtalab, N.,... & Neumann, G. (2020). Impact of Long-Term Organic and Mineral Fertilization on Rhizosphere Metabolites, Root–Microbial Interactions and Plant Health of Lettuce. *Frontiers in Microbiology*, *11*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.597745>
- Wu, S., Li, K., Diao, T., Sun, Y., Sun, T., & Wang, C. (2025). Influence of continuous fertilization on heavy metals accumulation and microorganism communities in greenhouse soils under 22 years of long-term manure organic fertilizer experiment. *Science of the Total Environment*, *959*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178294>
- Yagüe, M. R., y Lobo, M. C. (2024). Valorization of organic residues for lettuce production minimizes nitrogen loss in soil in comparison to mineral fertilization. *Journal of Plant Nutrition*, *47*(10), pp. 1680–1696. <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2319161>
- Zerga Heterat, K., & Tsegaye, B. (2019). Effect of Different Rates of Compost Application on Growth Performance and Yield Components of Carrot (*Daucus carota* L.) in Gurage Zone, Ethiopia. *International Journal of African and Asian Studies*, *54*, pp. 24–31. <https://doi.org/10.7176/jaas/54-03>
- Zhou, S., Song, Z., Li, Z., Qiao, R., Li, M., Chen, Y., & Guo, H. (2022). Mechanisms of nitrogen transformation driven by functional microbes during thermophilic fermentation in an ex situ fermentation system. *Bioresource Technology*, *350*, 126917. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126917>