

Artículo Científico

Efectividad de las asociaciones micorrízicas arbusculares en la remoción vegetal de zinc en suelos contaminados del cantón Mocache, provincia de Los Ríos

Effectiveness of arbuscular mycorrhizal associations in the plant-mediated removal of zinc from contaminated soils in Mocache County, Los Ríos Province



Prieto-Benavides, Oscar Oswaldo ¹



<https://orcid.org/0000-0003-4101-0523>



oprieto@uteq.edu.ec



Universidad Técnica Estatal de Quevedo,
Ecuador, Quevedo



Jiménez-Romero, Edwin Miguel ²



<https://orcid.org/0000-0002-7411-8189>



ejimenez@uteq.edu.ec



Universidad Técnica Estatal de Quevedo,
Ecuador, Quevedo



Eguez-Enriquez, Erick Alberto ³



<https://orcid.org/0000-0002-7071-4645>



eequez@uteq.edu.ec



Universidad Técnica Estatal de Quevedo,
Ecuador, Quevedo



Sánchez-Loor, Narcisa Claribel ⁴



<https://orcid.org/0009-0000-5105-6205>



nsanchez12@uteq.edu.ec



Universidad Técnica Estatal de Quevedo,
Ecuador, Quevedo

Autor de correspondencia ¹



DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v4/n1/136>

Resumen: La contaminación de suelos agrícolas por zinc (Zn) constituye un factor limitante para la productividad y un riesgo para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas intensivos. Las micorrizas arbusculares (HMA) son asociaciones simbióticas que pueden modificar la disponibilidad del metal en la rizosfera y contribuir a su adquisición, inmovilización o translocación bajo condiciones de estrés. El objetivo del estudio fue evaluar el potencial de las HMA para mejorar la fitoextracción de Zn en suelos contaminados del cantón Mocache, Ecuador, utilizando *Oryza sativa* como planta trampa. Se identificaron las especies y densidades de esporas presentes en suelos de cultivo de cacao, se inocularon plantas de arroz con un inóculo comercial y se aplicaron tres concentraciones de Zn (100, 150 y 200 mg kg⁻¹). Se midieron variables agronómicas y la concentración de Zn en el suelo antes y después del experimento. Se identificaron 16 especies de HMA, destacándose *Claroideoglomus lamellosum*, *Acaulospora colombiana*, *A. koskei* y *A. bireticulata*, con densidades bajas en todas las muestras. Las variables altura de planta y número de hojas presentaron diferencias significativas entre tratamientos, indicando la influencia combinada de la inoculación y el estrés por Zn. Aunque el análisis de varianza no mostró diferencias significativas en la concentración final de Zn en suelo, se observaron tendencias a la reducción en unidades inoculadas. Los resultados evidencian que la inoculación con HMA puede mejorar el desempeño agronómico y apoyar la fitoextracción de Zn, constituyendo una alternativa viable para la rehabilitación de suelos agrícolas contaminados.

Palabras clave: fitoextracción, micorrizas arbusculares, *Oryza sativa*, contaminación, metal pesado.



Check for
updates

Received: 07/Ene/2026
Accepted: 12/Ene/2026
Published: 30/Ene/2026

Cita: Prieto-Benavides, O. O., Jiménez-Romero, E. M., Eguez-Enriquez, E. A., & Sánchez-Loor, N. C. (2026). Efectividad de las asociaciones micorrízicas arbusculares en la remoción vegetal de zinc en suelos contaminados del cantón Mocache, provincia de Los Ríos. *Revista Científica Ciencia Y Método*, 4(1), 122-139. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v4/n1/136>

Revista Científica Ciencia y Método (RCyM)
<https://revistacym.com>
revistacym@editorialgrupo-aea.com
info@editorialgrupo-aea.com

© 2026. Este artículo es un documento de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la **Licencia Creative Commons. Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.**



Abstract:

Soil contamination by zinc (Zn) is a limiting factor for plant productivity and an environmental risk in intensive agricultural systems. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) are symbiotic associations capable of modifying metal dynamics in the rhizosphere, contributing to the acquisition, immobilization, or controlled translocation of Zn under stress conditions. The aim of this study was to evaluate the potential of AMF to enhance Zn phytoextraction in contaminated soils from Mocache, Ecuador, using *Oryza sativa* as a trap plant. Sixteen AMF species were identified, including *Claroideoglomus lamellosum*, *Acaulospora colombiana*, *A. koskei*, and *A. bireticulata*, all exhibiting low spore densities. Rice plants were inoculated with a commercial inoculum and exposed to Zn concentrations of 100, 150, and 200 mg kg⁻¹. Significant differences in plant height and number of leaves were observed among treatments, reflecting the interaction between AMF inoculation and metal stress. Although the analysis of variance did not show significant differences in soil Zn concentrations after the experiment, inoculated units showed decreasing trends. The findings indicate that AMF inoculation can enhance agronomic performance and support Zn phytoextraction, representing a viable alternative for the remediation of metal-contaminated agricultural soils.

Keywords: phytoextraction, arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), *Oryza sativa*, contamination, heavy metal.

1. Introducción

El zinc (Zn) es un metal pesado esencial para el cuerpo humano cuya cantidad en el individuo adulto oscila entre 1 y 2,5 g. Se considera que la ingesta recomendada se encuentra entre 8 mg/día para las mujeres y 11 mg/día para los hombres, pero cuando se ingiere en cantidades superiores a estas puede ser perjudicial para la salud humana (Rubio *et al.*, 2007). De acuerdo con la tabla 1 del libro VI Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes del recurso agua de la ley de gestión ambiental Ministerio del Ambiente. (2015) se plantea el límite máximo permisible de Zinc para aguas de consumo humano y uso doméstico que únicamente requiere un tratamiento convencional de 5,0 mg/l y cuando supera esta cantidad es considerado como contaminante (Ministerio del Ambiente, 2015). En el anexo 2 de la Norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados en la tabla 2 criterios calidad del suelo se establece para el Zinc 60mg/kg unidades de concentración en peso seco (Ministerio del Ambiente, 2015).

En las plantas el zinc es captado por las raíces como ión bivalente que puede ser fácilmente absorbido por la epidermis foliar y ramas, donde está implicado en la síntesis del triptófano, precursor clave de las auxinas que estimula las diversas actividades enzimáticas en los vegetales, el metabolismo del nitrógeno y la

pigmentación del ácido ascórbico (Mamani Sánchez, 2011). Se encuentra bajo formas químicas solubles en el agua, con posiciones no cambiables, precipitado, en organismos y restos orgánicos (Vilcapoma, 2019).

Incluyendo el crecimiento de estas, donde su cantidad para desarrollarse oscila entre 15 y 20 miligramos por kilogramo de tejido seco que en el proceso de la fotosíntesis se lleve a cabo el metabolismo de los carbohidratos en las plantas, debido a que este elemento estabiliza o activa las proteínas involucradas en dichos procesos (Amezcuza y Lara, 2017). La contaminación de los suelos a causa de Zinc, está relacionada con las malas prácticas en la agricultura que afectan directamente el crecimiento de las plantas. Se debe considerar el tipo de contaminante, las condiciones del sitio y el nivel de limpieza puesto que pueden existir diversas tecnologías de fitorremediación que pueden variar dependiendo del método a utilizarse entre las que se destacan la rizofiltración, fitoestabilización y fitoinmovilización, fitodegradación, fitoextracción y fitovolatilización (Delgadillo *et al.*, 2011).

La fitoextracción que presenta ventajas competitivas en cuanto a costos para controlar la erosión y evapotranspirar en grandes cantidades de agua (Beltrán, 2001). Las micorrizas arbusculares presentan gran importancia en la zona de las raíces donde el hongo desarrolla una red que puede explorar el suelo, capturar nutrientes y agua para la planta. De esta manera mejora la sanidad de las plantas que aumenta la tolerancia al ataque de patógenos mediante la conservación de la funcionalidad de la raíz durante la infección (Calle *et al.*, 2019).

En Ecuador, la superficie sembrada con arroz en el año 2013 fue de 414.096 hectáreas, con una producción de 1515,836 t, aportando la provincia de los Ríos el 93.79% (Viteri y Zambrano, 2017). En este proyecto se busca optimizar la fitoextracción de Zinc en suelos contaminados de cultivos de arroz, cantón Mocache utilizando la inoculación de micorrizas arbusculares puesto que en esta zona de estudio existe la poca presencia de estudios que permitan la evaluación de la eficacia de las micorrizas en cultivos de arroz, lo que contribuye al área de investigación agricultura y sub área agricultura, silvicultura y pesca en la sub línea evaluación de la calidad del agua, aire y suelo, incluyendo las alternativas de mitigación a los impactos ambientales (Garzón, 2015).

Se contribuye al plan de creación de oportunidades 2021 a 2025 de Ecuador en el eje social del objetivo 8 generar nuevas oportunidades y bienestar para las zonas rurales, con énfasis en pueblos y nacionalidades; eje de transición ecológica de recursos naturales, conservación de los ecosistemas, deforestación y patrimonio natural Cambio climático, conservación de los ecosistemas, prácticas ambientales; Objetivo 11 conservar, restaurar, proteger y hacer un uso sostenible de los recursos naturales; Objetivo 12. Fomentar modelos de desarrollo sostenibles aplicando medidas de adaptación y mitigación al Cambio Climático (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2021). Por tal motivo, esta investigación evaluará la eficacia de diferentes

cepas de micorrizas arbusculares y se determinará su capacidad para aumentar la acumulación de zinc en las plantas y reducir su concentración en el suelo.

2. Materiales y métodos

La investigación se realizó en el cantón Mocache, provincia de Los Ríos, Ecuador (1°11'26" S; 79°30'22" O). El experimento se ejecutó en los laboratorios de Microbiología y Biología Molecular y en el invernadero del Campus “La María” de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, ubicado a 72 m s. n. m. La zona climática corresponde a bosque húmedo tropical, con temperatura promedio de 26 °C, humedad relativa de 87.7 % y precipitación anual de 2 274 mm.

Recolección de suelo y caracterización inicial:

Se recolectaron cinco muestras compuestas de suelo procedentes de un cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) con nula utilización de agroquímicos y tomadas en la rizosfera a 0-20 cm de profundidad. Estas muestras se utilizaron para identificar las especies de hongos micorrícicos arbusculares (HMA) presentes en el sitio de estudio.

El análisis preliminar de Zn semitotal del suelo se realizó en el laboratorio de suelos, aguas y tejidos vegetales del INIAP mediante digestión ácida y espectrofotometría de absorción atómica.

Aislamiento, conteo y caracterización de esporas de HMA:

Las esporas se extrajeron empleando el método de tamizado y decantación en húmedo descrito por Gerdemann y Nicolson (1963), utilizando tamices de 500, 425, 90 y 75 µm. Posteriormente, se aplicó centrifugación en gradiente de sacarosa (20-60%) para la separación de propágulos.

El conteo se realizó en cajas Petri cuadriculadas (1.25 cm entre líneas), expresando la densidad como esporas/50 g de suelo seco con base en el criterio de Oehl et al. (2010).

La identificación morfológica se efectuó mediante microscopía óptica, considerando tamaño, color, estructura de paredes y referencias digitales de INVAM., de acuerdo con la tabla 1.

Tabla 1
Criterio densidad de esporas.

Característica	Categoría
Densidad baja	< 1 espora gramo de suelo
Densidad media	1 a 10 esporas gramo de suelo
Densidad alta	> 10 esporas gramo de suelo

Nota: (Autores, 2026).

Material vegetal y germinación de planta trampa:

Se utilizaron semillas de arroz (*Oryza sativa*) seleccionadas por uniformidad. Estas fueron desinfectadas con hipoclorito de sodio al 3% durante 3 min y enjuagadas con agua destilada estéril. El sustrato estuvo conformado por una mezcla de suelo nativo, turba y perlita, esterilizada en autoclave (1 h). Las semillas se sembraron en recipientes con 10 semillas por unidad y se mantuvieron bajo riego con agua destilada estéril durante 8 días previos a la inoculación.

Inoculación micorrízica:

A los 8 días después de la siembra, se incorporó inóculo comercial en dos formulaciones: sólida y líquida (cada cantidad escogida contenía 10 esporas en promedio), además de un tratamiento con suelo esporulado (HMA nativos) aislado de suelo procedente de cacao. Las dosis aplicadas fueron las identificadas en la tabla 2.

Tabla 2
Productos de inoculación

Productos inoculación	Cantidad
Solido comercial	9 g
Liquido comercial	4ml
Suelo micorrizas	10 micorrizas por cada tubo eppendorf

Nota: (Autores, 2026).

Aplicación de zinc: A los 15 días después de la siembra se aplicó el zinc utilizando sulfato de zinc heptahidratado ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, pureza 29.79%), ajustado mediante regla de tres para obtener las concentraciones finales de 200, 150 y 100 mg kg⁻¹, correspondientes a niveles alto, medio y bajo, respectivamente. Las soluciones fueron preparadas en agua destilada y posteriormente incorporadas de manera homogénea en cada unidad experimental para garantizar una distribución uniforme del metal en el sustrato.

Diseño experimental:

Se utilizó un diseño completamente al azar (DCA) con 12 tratamientos resultantes de la combinación de 4 tipos de inoculación (líquido comercial, sólido comercial, suelo esporulado, testigo) × 3 concentraciones de Zn, con un total de 96 unidades experimentales.

Variables agronómicas evaluadas:

Durante 32 días se evaluaron semanalmente diversas variables agronómicas asociadas al desarrollo inicial de *Oryza sativa*, incluyendo el número de semillas germinadas, la altura de las plantas medida desde la base del tallo hasta la hoja más alta, y el número total de hojas emitidas por plántula. También se registró el diámetro del tallo mediante un calibrador digital, así como la longitud total de la raíz obtenida tras la extracción del sustrato.

Finalmente, se determinó la biomasa mediante la medición del peso fresco de raíces y hojas, y del peso seco de ambos tejidos después de un proceso de deshidratación

en estufa a 60 °C durante 72 horas, lo que permitió cuantificar el crecimiento real de las plantas sin influencia del contenido hídrico.

Los datos se sometieron a análisis de varianza (ANOVA) para determinar diferencias significativas entre tratamientos. En los casos pertinentes se aplicó prueba de comparación de medias con un nivel de significancia de $p \leq 0.05$. El procesamiento estadístico se realizó con el software SPSS v25, conforme al procedimiento aplicado en la tesis.

3. Resultados

3.1. Diversidad y densidad de esporas de HMA en el suelo de cacao

En el análisis de las muestras de suelo procedentes del cacaotal de Mocache se identificaron 16 especies de hongos micorrícicos arbusculares (HMA), en las cinco muestras de suelo se identificaron 16 especies *claroideoglomus lamellosum*, *Acaulosporaceae colombiana*, *A.koskei*, *A. enticulata*, *A. bireticulata*, *Acaulospora sp*, *Acaulospora foveata*, *Acaulospora kentinensis*, *Glomus fistulosum*, *Glomus maculosum*, *Glomus pansihalos*, *Glomus hoy*, *Glomus sp 1*, *Glomus sp 2*, *Rhizófago intraradices*, *Rhizófago manihotis*.

Tabla 3
Diversidad de micorrizas

Familias	Especies	Diversidad	Forma	Color
Claroideoglomeraceae	claroideoglomus lamellosum	1	Globosa subglobosa	a Amarillo pálido
			Globosa	a
Acaulosporaceae	A. colombiana	4	subglobosa	Marrón anaranjado
			Globosa	a Marrón anaranjado
	A.koskei	2	subglobosa	oscuro
			Globosa,	Marrón anaranjado
	A. enticulata	3	subglobosa	oscuro
	A. bireticulata	5	Globosa	Marrón claro
	Acaulospora sp	2		Marrón anaranjado
			Globosa	a
	Acaulospora foveata	1	subglobosa	Rojo anaranjado
	Acaulospora kentinensis	1	Globosa subglobosa	a Marrón anaranjado
Glomeraceae	Glomus fistulosum	3	Globosa subglobosa	a Amarillo claro
			Globosa	a
	Glomus maculosum	4	subglobosa	Hialino
	Glomus pansihalos	1	Globosa	Amarillo-marrón
	Glomus hoi	1	subglobosa	Marrón claro
	Glomus sp 1	2	Globosa	Marrón oscuro
	Glomus sp 2	1	Globosa	Naranja
			Globosa,	
	Rhizófago intraradices	5	subglobosa	Marrón amarillento
	Rhizófago manihotis	1	Globosa	Marrón amarillento

Nota: (Autores, 2026).

De las cinco muestras de suelos recolectadas se identificaron valores promedios de esporas; teniendo en cuenta dos repeticiones del proceso de selección de esporas por cada 50g en la R1 y R2, el promedio y la relación esporas por los 100 gramos de suelo. Los resultados en promedio cuentan con una densidad baja entre 0,23 y 0,27 esporas/gramo de suelo donde las M2 y M3 representan los valores más altos. Esto se ve influenciado por las condiciones climáticas, como la temperatura y la humedad que pueden tener un impacto significativo en la producción y dispersión de esporas.

Tabla 4
Diversidad de las esporas en las muestras de suelo.

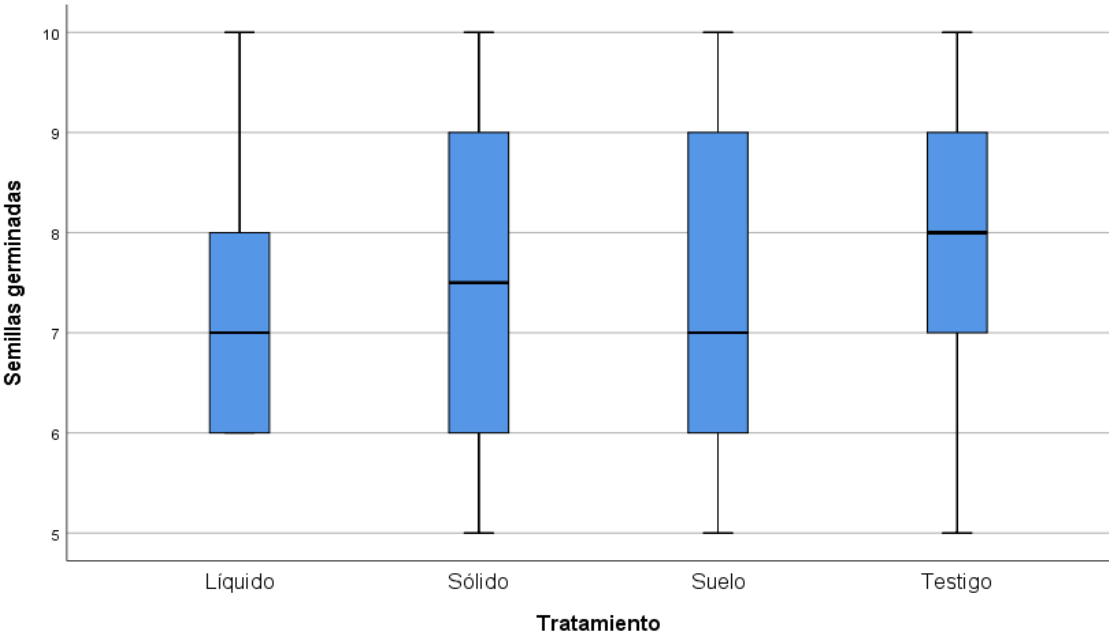
Muestra	R1	R2	Promedio	E/100	Densidad
M1	10	2	6,0	0,060	Baja
M2	13	14	13,5	0,270	Baja
M3	19	6	12,5	0,250	Baja
M4	14	2	8,0	0,160	Baja
M5	10	13	11,5	0,230	Baja

Nota: (Autores, 2026).

3.2. Germinación y establecimiento inicial de *Oryza sativa*

La variable de semillas germinadas no presentó diferencias notorias entre tratamientos, lo que indica que las concentraciones de Zn aplicadas no afectaron significativamente la fase inicial de emergencia. Aunque no se apreciaron diferencias estadísticas, las unidades inoculadas mostraron una emergencia ligeramente más uniforme que el testigo, lo cual está relacionado con una mayor estabilidad del sustrato y mejor disponibilidad de nutrientes esencialmente movilizados por las hifas micorrícicas.

Figura 1
Cajas de bigotes de semillas germinadas



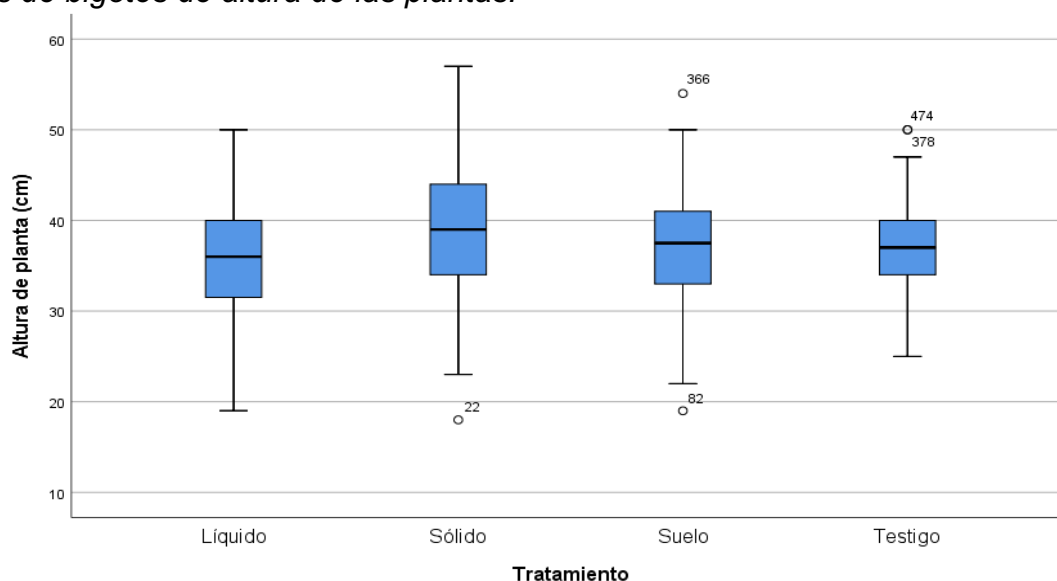
Nota: (Autores, 2026).

3.3. Altura de plantas

Los resultados revelaron diferencias significativas en la altura de las plantas entre tratamientos, con valores superiores en las unidades inoculadas comparadas con el testigo sin inoculación. Las plantas inoculadas con el inóculo comercial mostraron mayor vigor y elongación del tallo, particularmente en los tratamientos de 100 y 150 mg kg⁻¹ de Zn.

Figura 2

Cajas de bigotes de altura de las plantas.



Nota: El grafico representa la caja de bigotes de los tratamientos, se obtuvo de IBM SPSS Statistics 25 (Autores, 2026).

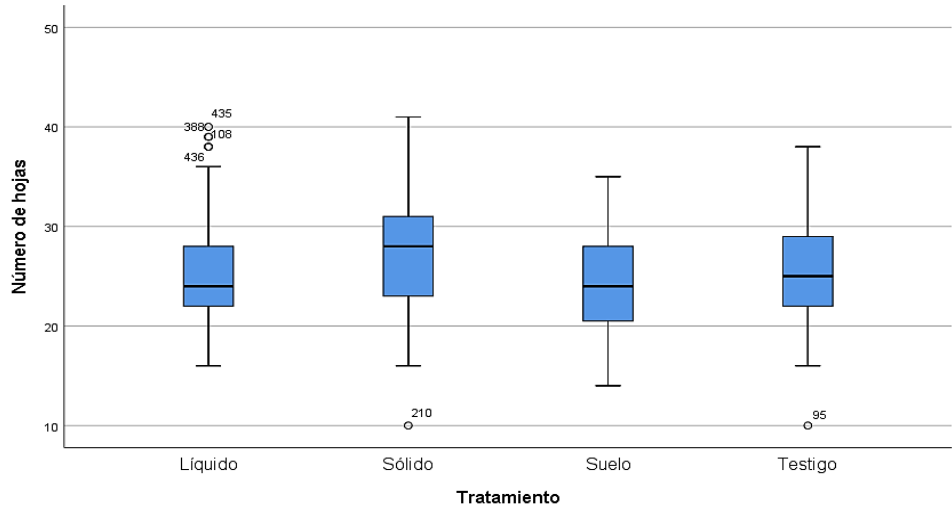
3.4. Número de hojas

El número de hojas siguió una tendencia similar a la altura, con mayor rendimiento foliar en tratamientos inoculados. Las concentraciones de 200 mg kg⁻¹ afectaron negativamente la emisión de hojas, especialmente en las unidades no inoculadas, lo que sugiere un umbral de tolerancia superado en ausencia de micorrización.

En el tratamiento sólido, la dispersión de los datos se refleja en la extensión de los bigotes hasta alcanzar el valor máximo de 42, contrastando con los tratamientos testigo, líquido y suelo, los cuales presentan valores máximos de 38, 36 y 35, respectivamente. En cuanto a los valores mínimos, se aprecia una relativa homogeneidad entre los tratamientos líquido, sólido y testigo, con mínimos registrados de 15, mientras que el tratamiento de suelo exhibe un valor mínimo ligeramente inferior, situándose en 12.

La mediana, como medida de tendencia central, revela particularidades en los diferentes tratamientos. El tratamiento sólido destaca al presentar una mediana de 28, en contraste con los tratamientos líquido, suelo y testigo, donde la mediana permanece constante. Este patrón sugiere una mayor concentración de hojas en el tratamiento sólido.

Figura 3
Cajas de bigotes de número de hojas



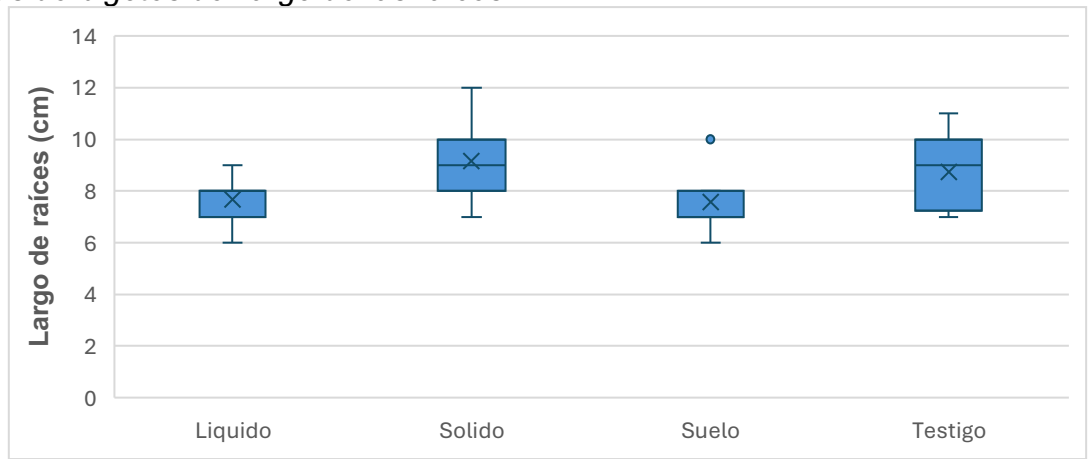
Nota: El grafico representa la caja de bigotes de los tratamientos, se obtuvo de IBM SPSS Statistics 25 (Autores, 2026).

3.5. Longitud de raíces

Los tratamientos sólido y testigo exhiben similitudes en la dispersión de los datos, mientras que los tratamientos líquido y suelo presentan una homogeneidad relativa en sus distribuciones. La detección de valores atípicos, particularmente en el tratamiento de suelo, sugiere una variabilidad inusual en este tratamiento en comparación con los demás.

En relación con las medidas de tendencia central, se destaca la mayor mediana en los tratamientos sólido y testigo metal, seguida por el tratamiento líquido. Por otro lado, el tratamiento de suelo muestra la mediana de menor proporción entre los tratamientos evaluados. Este patrón de distribución de medianas sugiere una concentración significativa de datos en los tratamientos sólido y testigo metal, lo que contrasta con la menor concentración observada en el tratamiento de suelo.

Figura 4
Cajas de bigotes del largo de las raíces



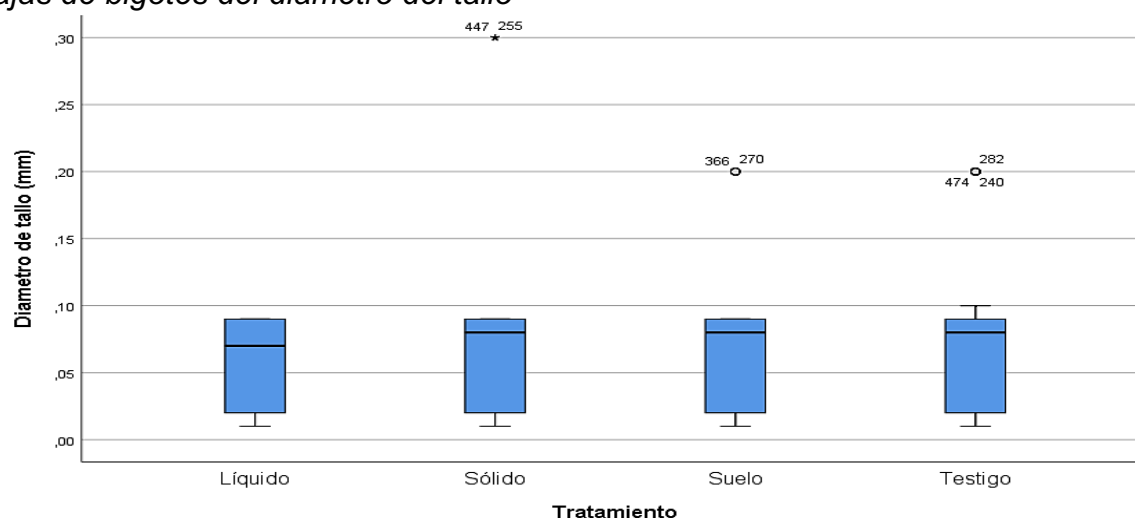
Nota: El grafico representa la caja de bigotes de los tratamientos, se obtuvo de IBM SPSS Statistics 25 (Autores, 2026).

3.6. Diámetro del tallo

En el tratamiento líquido, los bigotes se extienden hasta el valor máximo de 10, mientras que, en los tratamientos sólido, suelo y testigo, abarcan el rango entre el valor mínimo y máximo de 5-10. En relación con las medidas de tendencia central, la mediana, que divide la caja en partes iguales, exhibe patrones distintivos en los diversos tratamientos. Es especialmente notable que la mediana predomine en el tratamiento testigo metal, presentando un valor de 8. En segundo lugar, el tratamiento sólido muestra una mediana de 7.5, mientras que los tratamientos líquido y suelo comparten la mediana más baja de 7.

Figura 5

Cajas de bigotes del diámetro del tallo



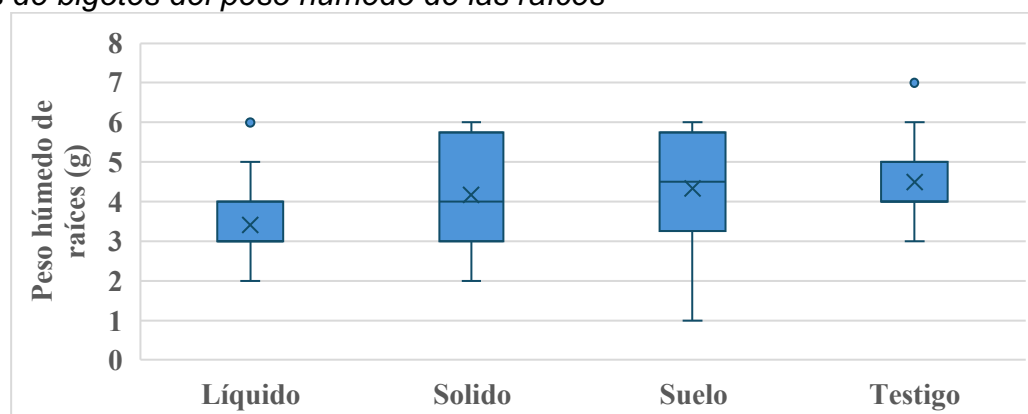
Nota: El gráfico representa la caja de bigotes de los tratamientos, se obtuvo de IBM SPSS Statistics 25 (Autores, 2026).

3.7. Peso húmedo de las raíces

La identificación de valores atípicos, especialmente en los tratamientos de líquido y testigo, indica una variabilidad inusual en comparación con los demás tratamientos estudiados. En cuanto a las medidas de tendencia central, se observa una mediana destacada en los tratamientos de suelo, sólido y testigo. Contrariamente, el tratamiento líquido exhibe la mediana de menor magnitud entre los tratamientos evaluados.

Este análisis detallado de la variabilidad y de las medidas de tendencia central en el peso húmedo de las raíces proporciona una visión más precisa y profunda sobre las respuestas fisiológicas de las plantas frente a los diferentes tratamientos experimentales. Al evaluar tanto la dispersión como el comportamiento promedio de los datos, es posible identificar cómo la inoculación micorrízica modula la retención hídrica en las raíces y cómo las distintas concentraciones de Zn influyen en la capacidad de la planta para mantener tejidos hidratados.

Figura 6
Cajas de bigotes del peso húmedo de las raíces



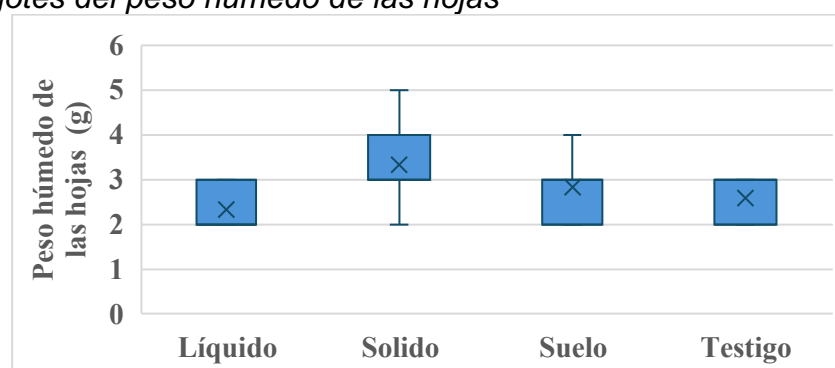
Nota: El gráfico representa la caja de bigotes de los tratamientos, se obtuvo de IBM SPSS Statistics 25 (Autores, 2026).

3.8. Peso húmedo de las hojas

Se evidencia una marcada variabilidad entre los tratamientos, resaltando especialmente el comportamiento del tratamiento sólido en comparación con los tratamientos líquido, suelo y testigo. Es importante mencionar que no se identificaron valores atípicos en ninguno de los casos, lo que indica una distribución uniforme dentro de los rangos esperados.

Respecto a las medidas de tendencia central, los tratamientos sólidos, suelo y testigo presentan medianas similares, lo que sugiere una distribución relativamente consistente entre ellos. En cambio, el tratamiento líquido muestra una mediana de menor magnitud, lo que podría reflejar una tendencia hacia valores más bajos frente a los demás tratamientos evaluados.

Figura 7
Cajas de bigotes del peso húmedo de las hojas



Nota: El gráfico representa la caja de bigotes de los tratamientos, se obtuvo de IBM SPSS Statistics 25 (Autores, 2026).

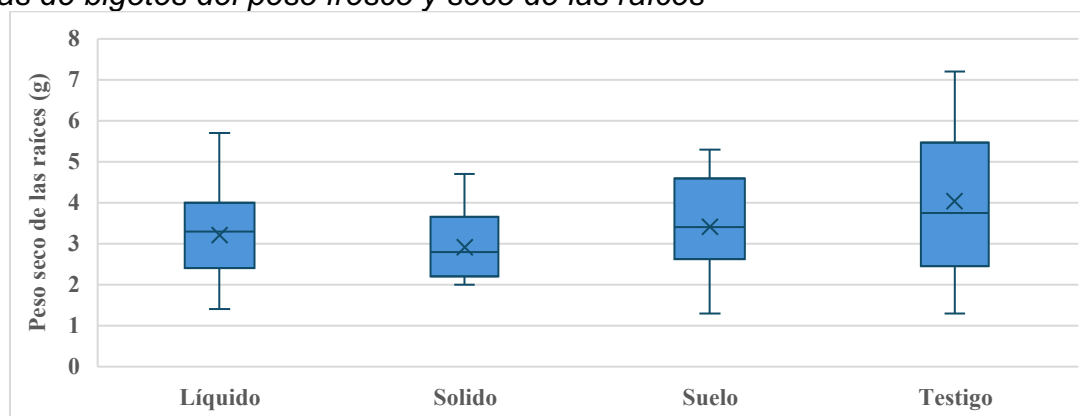
3.9. Peso fresco y seco de raíces

Los tratamientos inoculados mostraron los valores más altos de peso fresco y seco de raíces, salvo en la dosis más alta de Zn (200 mg kg^{-1}), donde la biomasa disminuyó incluso con inoculación. Este patrón evidencia que la micorrización mejora el

desarrollo radicular, pero su efecto amortiguador tiene límites cuando el estrés metálico es elevado.

Figura 8

Cajas de bigotes del peso fresco y seco de las raíces



Nota: El gráfico representa la caja de bigotes de los tratamientos, se obtuvo de IBM SPSS Statistics 25 (Autores, 2026).

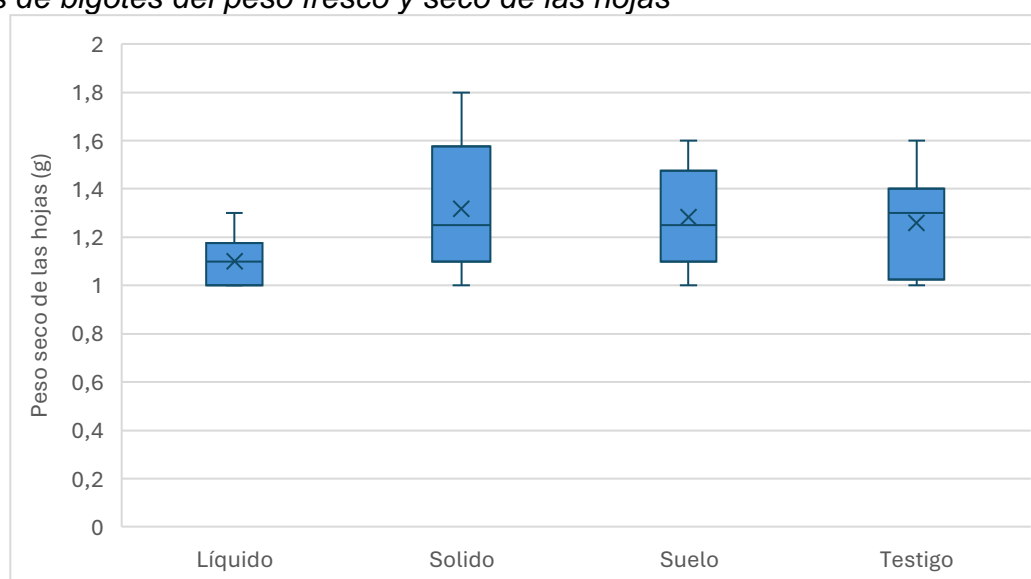
3.10. Peso fresco y secos de hojas

El análisis de biomasa aérea evidenció que las plantas inoculadas mostraron mayor peso fresco y seco, especialmente en los tratamientos de 100 y 150 mg kg⁻¹. La inoculación permitió mantener la turgencia y funcionalidad de hojas incluso bajo la presencia de Zn.

En la dosis más alta de Zn (200 mg kg⁻¹) se observó una disminución marcada tanto en biomasa fresca como seca, incluso en plantas inoculadas, lo que sugiere que, a concentraciones elevadas, el Zn ejerce un efecto tóxico que supera la capacidad amortiguadora de la micorrización.

Figura 9

Cajas de bigotes del peso fresco y seco de las hojas



Nota: El gráfico representa la caja de bigotes de los tratamientos, se obtuvo de IBM SPSS Statistics 25 (Autores, 2026).

3.11. Concentración final de Zn en el suelo

El análisis de varianza (ANOVA) reveló un modelo corregido con una suma de cuadrados de 2318,364, 3 grados de libertad, y una media cuadrática de 772,788. La intersección, con una suma de cuadrados de 550,939,595 y una prueba F de 286,189 ($p < 0,001$), muestra una contribución significativa al modelo, indicando la presencia de factores determinantes en la concentración de zinc. Sin embargo, el término de tratamiento no muestra significancia estadística ($F = 0,401$, $p = 0,753$). Este resultado influye en que las plantas sensibles presentan retardo en su crecimiento y daño en tejidos con 150 a 200 mg/kg de Zn, puesto que, de manera general, el intervalo de toxicidad varía de 100 a 500 mg/kg de Zn.

Tabla 5

Variabilidad en la concentración de Zinc (pruebas de efectos inter-sujetos)

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	2318,364 ^a	3	772,788	,401	,753
Intersección	550939,595	1	550939,595	286,189	,000
Tratamiento	2318,364	3	772,788	,401	,753
Error	84703,900	44	1925,089		
Total	637961,858	48			
Total, corregido	87022,263	47			

a. R al cuadrado = ,027 (R al cuadrado ajustada = -,040)

Nota: (Autores, 2026).

3.12. Regresión de variables vegetales y Zinc

Los resultados revelan asociaciones significativas y relevantes. La variable "Semilla" muestra una correlación positiva fuerte con un coeficiente de correlación de 0,413, explicando el 17% de la variabilidad observada, con una significancia estadística de $p=0,001$.

En cuanto a la variable "Hojas", se observa una correlación positiva más modesta (0,104), pero aún significativa ($p=0,041$), explicando el 1% de la variabilidad. El "Tallo" exhibe una correlación positiva considerable (0,187) y una significancia de $p=0,039$, contribuyendo al 3% de la variabilidad. Por último, la variable "Altura" revela una correlación positiva robusta con un coeficiente de 0,356, explicando el 13% de la variabilidad, y una significancia estadística de $p=0,001$.

Tabla 6

Resultados de las variables vegetales y Zinc

Variable	Coeficiente de correlación	Coeficiente de determinación R^2	Significancia
Semilla	0,413234432	0,170762696	$p=0,001$
Hojas	0,103910181	0,010797326	$p=0,041$
Tallo	0,186714657	0,034862363	$p=0,039$
Altura	0,35620257	0,126880271	$P=0,001$

Nota: (Autores, 2026).

4. Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian el papel modulador de las asociaciones micorrízicas arbusculares (HMA) sobre el crecimiento inicial de *Oryza sativa* y su respuesta frente al estrés por zinc (Zn) en suelos contaminados del cantón Mocache. La identificación de 16 especies de HMA en los suelos de cacao, aunque con densidades bajas, confirma la presencia de una comunidad micorrízica diversa pero limitada, condición que ha sido asociada previamente a sistemas agrícolas sometidos a manejo intensivo y perturbaciones antrópicas continuas (Moina-Quimi et al., 2018; Hickey, 2020).

La baja densidad de esporas registrada concuerda con lo reportado por Camarena (2012) y Oehl et al. (2010), quienes señalan que el monocultivo y el uso recurrente de agroquímicos reducen la abundancia y viabilidad de los propágulos micorrízicos (Mieles-Giler et al., 2024). No obstante, la diversidad observada sugiere que, aun bajo condiciones edáficas degradadas, persisten especies capaces de establecer simbiosis funcionales, lo que representa una oportunidad para estrategias de recuperación biológica del suelo.

En cuanto a la fase inicial del cultivo, la ausencia de diferencias significativas en la germinación indica que las concentraciones de Zn aplicadas no afectaron la emergencia de las plántulas, coincidiendo con lo señalado por Amezcua y Lara (2017), quienes destacan que los efectos fitotóxicos del Zn suelen manifestarse en etapas posteriores del desarrollo vegetativo (Campuzano-Santana et al., 2025). Sin embargo, la mayor uniformidad observada en las unidades inoculadas sugiere que la micorrización contribuyó a una mejor estabilidad fisiológica temprana.

Las variables altura de planta y número de hojas mostraron respuestas positivas claras a la inoculación micorrízica, especialmente en las concentraciones de 100 y 150 mg kg⁻¹ de Zn. Este comportamiento confirma que los HMA mejoran la eficiencia en la absorción y translocación de nutrientes, amortiguando el efecto del metal y favoreciendo el crecimiento aéreo, tal como lo reportan Saboor et al. (2021) y Vallejos-Torres et al. (2022). La dosis de 200 mg kg⁻¹ evidenció un umbral de tolerancia, donde incluso las plantas inoculadas presentaron reducciones en el desarrollo foliar, lo que coincide con los rangos de toxicidad descritos por Kabata-Pendias (2000).

La respuesta del sistema radical mostró que la micorrización influyó en la arquitectura y biomasa de las raíces, incrementando el peso fresco y seco bajo concentraciones moderadas de Zn (Herrera-Sánchez & Gavilánez-Buñay, 2023). Este efecto se atribuye a la expansión del volumen efectivo de absorción mediante las hifas micorrízicas y a una mejor conductividad hidráulica del sistema radical, como señala Vallejos-Torres et al. (2022).

Respecto a la concentración final de Zn en el suelo, aunque el ANOVA no mostró diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, se observaron tendencias a una mayor reducción del metal en unidades inoculadas. Chen et al. (2003) y Cardini et al. (2021) señalan que la transferencia y redistribución de Zn mediada por micorrizas depende del tiempo de establecimiento de la simbiosis y de la interacción planta-hongo-suelo.

Finalmente, las correlaciones positivas entre variables vegetativas y Zn indican que el crecimiento de *O. sativa* estuvo estrechamente vinculado a la disponibilidad y manejo del metal en el sustrato. La asociación más fuerte con la altura de planta refuerza la idea de que el crecimiento aéreo es un indicador sensible del efecto combinado del Zn y la micorrización (Caicedo-Aldaz & Herrera-Sánchez, 2022). Estos hallazgos respaldan el uso de micorrizas arbusculares como una herramienta biotecnológica viable para la rehabilitación de suelos agrícolas degradados en sistemas tropicales.

5. Conclusiones

En las cinco muestras recolectadas del sistema agroforestal de cacao en la finca experimental La María se identificaron 16 morfotipos de Hongos Micorrízicos Arbusculares, destacándose *Acaulosporaceae bireticulata* y *Glomeraceae Rhizófago intraradices*, aunque con baja densidad debido al clima, actividades antropogénicas y propiedades del suelo. Las plantas de arroz (*Oryza sativa*) inoculadas respondieron positivamente, mostrando altos niveles de infección y esporulación, lo que confirma que los HMA estimulan el desarrollo y las variables agronómicas.

Las principales respuestas agronómicas se observaron en el número de hojas (39) con el tratamiento líquido; la altura de planta (52 cm), peso húmedo de hojas (4 g/planta) y peso seco de hojas (1,6 g/planta) en el tratamiento sólido a 200 ppm; así como el largo de raíces (12 cm), peso húmedo de raíces (6 g) y peso seco de raíces (5,3 g/planta) en tratamientos de suelo inoculado con esporas. El peso húmedo y seco del suelo también fue mayor en el tratamiento con esporas (123 g y 122 g). En general, los tratamientos sólidos e inoculados con esporas fueron los más efectivos.

Finalmente, la mayor extracción de zinc del suelo se obtuvo en el tratamiento de suelo con esporas R2_TSE_200 (188,9 mg/kg), mientras que la menor cuantificación correspondió al tratamiento líquido R4_TL_100 (28,28 mg/kg).

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.

Referencias Bibliográficas

- Amezcu, J. C., & Lara, M. (2017). El Zinc en las Plantas. *Ciencia*, 68(3), 28–35. <http://www.smart-fertilizer.com/es/articles/zinc-in-plants>
- Beltrán Villavicencio, M. (2001). *Fitoextracción en suelos contaminados con cadmio y zinc usando especies vegetales comestibles* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco]. Repositorio Institucional Zaloamati. <https://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/185>
- Caicedo-Aldaz, J. C., & Herrera-Sánchez, D. J. (2022). El Rol de la Agroecología en el Desarrollo Rural Sostenible en Ecuador. *Revista Científica Zambos*, 1(2), 1-16. <https://doi.org/10.69484/rcz/v1/n2/24>
- Calle, C. M., Calle, C. A. Á., & Rivillas Osorio, C. A. (2019). Micorrizas arbusculares. En Centro Nacional de Investigaciones de Café (Ed.), *Aplicación de ciencia tecnología e innovación en el cultivo del café ajustado a las condiciones particulares del Huila: Vol. 1. 2015–2019*. Cenicafé. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0005>
- Camarena, G. (2012). Interaccion planta-hongos micorrizicos arbusculares. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 18(3), 409–421. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.11.093>
- Campuzano-Santana, K. L., Alarcón-Giraldo, V. D. ., & España-Lema, A. I. . (2025). Evaluación ambiental de sistemas agrícolas y forestales mediante análisis poblacional de nematodos como bioindicadores. *Journal of Economic and Social Science Research*, 5(2), 132-143. <https://doi.org/10.55813/gaeal/jessr/v5/n2/193>
- Cardini, A., Pellegrino, E., Declerck, S., Calonne-Salmon, M., Mazzolai, B., & Ercoli, L. (2021). Direct transfer of zinc between plants is channelled by common mycorrhizal network of arbuscular mycorrhizal fungi and evidenced by changes in expression of zinc transporter genes in fungus and plant. *Environmental Microbiology*, 23(10), 5883–5900. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.15542>
- Chen, B. D., Li, X. L., Tao, H. Q., Christie, P., & Wong, M. H. (2003). The role of arbuscular mycorrhiza in zinc uptake by red clover growing in a calcareous soil spiked with various quantities of zinc. *Chemosphere*, 50(6), 839–846. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00228-X](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00228-X)
- Delgadillo, A. E., González, C. A., Prieto, F., Villagómez, J. R., & Acevedo, O. (2011). Fitorremediación una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 597–612. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n2/v14n2a2.pdf>
- Garzón, L. P. (2015). Importancia de las micorrizas arbusculares (ma) para un uso sostenible del suelo en la amazonia colombiana. *Luna Azul*, (42), 217–234. <https://doi.org/10.17151/luaz.2016.42.14>
- Gavito, M. E., Pérez, C., González, M. C., Vieyra, H. T., & Martínez, T. M. (2008). High compatibility between arbuscular mycorrhizal fungal communities and seedlings of different land use types in a tropical dry ecosystem. *Mycorrhiza* (19), 47-60. <https://doi.org/10.1007/s00572-008-0203-4>

- Gerdemann, J. W. ;, & Nicolson, T. H. (1963). Spores of mycorrhizal Endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society*, 46(2), 235-244. [http://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80079-0](http://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80079-0)
- Guevara, E., & Guenni, O. (2014). Densidad y longitud de raíces en plantas de *Leucaena leucocephala* (Lam.) De Wit. *Multiciencias*, 13(4), 372–380. <https://www.redalyc.org/pdf/904/90430055005.pdf>
- Guo, Y., Sommer, N., Martin, K., & Rasche, F. (2023). Rhizophagus *irregularis* improves Hg tolerance of *Medicago truncatula* by upregulating the Zn transporter genes ZIP2 and ZIP6. *Mycorrhiza*, 33, 23–32. <https://doi.org/10.1007/s00572-022-01100-6>
- Guthery, F. S., Green, M. C., Masters, R. E., DeMaso, S. J., Wilson, H. M., & Steubing, F. B. (2001). Land cover and bobwhite abundance on Oklahoma farms and ranches. *The Journal of Wildlife Management*, 65(4), 838–849. <https://doi.org/10.2307/3803033>
- Herrera-Sánchez, D. J., & Gavilánez-Buñay, T. C. (2023). Estrategias de agricultura regenerativa para mejorar la salud del suelo. *Revista Científica Ciencia Y Método*, 1(2), 15-28. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v1/n2/12>
- Hickey Darquea, A. T. (2020). *The hidden symbiont: Exploring arbuscular mycorrhizae in the Ecuadorian Amazon* [Tesis de pregrado, Universidad San Francisco de Quito]. Repositorio Digital USFQ. <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/9576>
- Jungk, A., & Claassen, N. (1997). Ion diffusion in the soil–root system. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in agronomy* (Vol. 61, pp. 53–110). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60662-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60662-8)
- Kabata-Pendias, A. (2000). *Trace elements in soils and plants* (3.^a ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420039900>
- Klironomos, J. N., McCune, J., & Moutoglis, P. (2004). Species of arbuscular mycorrhizal fungi affect mycorrhizal responses to simulated herbivory. *Applied Soil Ecology*, 26(2), 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2003.11.001>
- Lovelock, C. E., Andersen, K., & Morton, J. B. (2003). Arbuscular mycorrhizal communities in tropical forests are affected by host tree species and environment. *Oecologia*, 135(2), 268–279. <https://doi.org/10.1007/s00442-002-1166-3>
- Mamani Sánchez, B. (2011). Principales Funciones de lo Macronutrientes y Síntomas de Deficiencia en las plantas. *Sistemas de Producción Vegetal II*, 23–25. https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4781/sistemas_de_produccion_vegetal_2.pdf
- Mieles-Giler, J. W., Guerrero-Calero, J. M., Moran-González, M. R., & Zapata-Velasco, M. L. (2024). Evaluación de la degradación ambiental en hábitats Naturales. *Journal of Economic and Social Science Research*, 4(3), 65–88. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v4/n3/121>

- Ministerio del Ambiente. (2015). *Texto unificado de legislación secundaria del Ministerio del Ambiente, Libro VI, Anexo 2: Norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados* (Acuerdo Ministerial 097-A). Registro Oficial, Edición Especial 387. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ecu112181.pdf>
- Moina-Quimi, E., Oviedo-Anchundia, R., Nieto-Barcelona, S., Herrera-Samaniego, P., & Barcos-Arias, M. (2018). Evaluación de los Hongos Micorrízicos Arbusculares de zonas del trópico húmedo del Ecuador. *Bionatura*, 3(1), 531–536. <https://doi.org/10.21931/RB/2018.03.01.9>
- Oehl, F., Laczko, E., Bogenrieder, A., Stahr, K., Bösch, R., van der Heijden, M. G. A., & Sieverding, E. (2010). Soil type and land use intensity determine the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(5), 724–738. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.01.006>
- Rosales, J. Y., Pérez, L., Sánchez, I., & Cruz, J. (2022). Micorrizas arbusculares y su efecto sobre el desarrollo vegetativo de portainjertos de limón (*Citrus limon* L.). Universidad Nacional Agraria, 22(38). <https://lacalera.una.edu.ni/index.php/CALERA/article/view/487/817>
- Rubio, C., González Weller, D., Martín-Izquierdo, R. E., Revert, C., Rodríguez, I., & Hardisson, A. (2007). El zinc: Oligoelemento esencial. *Nutrición Hospitalaria*, 22(1), 101–107. <https://doi.org/10.23853/bsehm.2001.0510>
- Saboor, A., Ali, M. A., Danish, S., Ahmed, N., Fahad, S., Datta, R., Ansari, M. J., Nasif, O., Rahman, M. H. ur, & Glick, B. R. (2021). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the physiological functioning of maize under zinc-deficient soils. *Scientific Reports*, 11(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97742-1>
- Secretaría Nacional de Planificación. (2021). *Plan de creación de oportunidades 2021–2025: Plan nacional de desarrollo*. Secretaría Nacional de Planificación. <https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/2021/09/Plan-de-Creación-de-Oportunidades-2021-2025-Aprobado.pdf>
- Vallejos-Torres, G., Tenorio-Cercado, M. A., Gaona-Jimenez, N., Corazon-Guivin, M. A., Luna, J. O., Paredes, C. I., Saavedra, J., Tuesta, J. C., Tuesta, O. A., Alguacil, M. M., Becerra, A. G., & Marín, C. (2022). Multiplication of arbuscular mycorrhizal fungi isolated from cocoa cultivated soils. *Bioagro*, 34(3), 265–276. <https://doi.org/10.51372/bioagro343.6>
- Vilcapoma Areche, D. (2019). *Fitoextracción de cadmio y zinc en suelos contaminados utilizando Lactuca sativa var. White Boston, en la EEA El Mantaro – Junín 2019* [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional UNCP. <https://hdl.handle.net/20.500.12894/5460>
- Viteri Viteri, G. I., & Zambrano, C. E. (2016). Comercialización de arroz en Ecuador: Análisis de la evolución de precios en el eslabón productor-consumidor. *Ciencia y Tecnología*, 9(2), 11–17. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6261797>