

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROECOLOGÍA
MENCIÓN GESTIÓN AMBIENTAL



**EFECTO DE LOS HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES Y COMPOST EN LA
ABSORCIÓN DE CADMIO EN PLANTAS DE ARROZ (*Oryza sativa* L.), REGIÓN SAN
MARTÍN.**

TESIS

Para optar el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROECOLOGÍA,
MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL**

**PRESENTADO POR:
JAMES FREDDY TUANAMA VALERA**

TINGO MARÍA – PERÚ

2022



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
UNIDAD DE POSGRADO
DIRECCIÓN



“Año del Fortalecimiento de la Soberanía Nacional”

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS
Nro. 018-UPG-FRNR-UNAS

En la ciudad universitaria, siendo las 05:00 a.m. del viernes 02 de diciembre de 2022, reunidos virtualmente vía Microsoft Teams, se instaló el Jurado Calificador a fin de proceder a la sustentación de la tesis titulada:

**“EFECTO DE LOS HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES Y COMPOST EN LA
ABSORCIÓN DE CADMIO EN PLANTAS DE ARROZ (*Oryza sativa* L.),
REGIÓN SAN MARTÍN”**

A cargo del candidato al Grado de Maestro en Ciencias en Agroecología, mención: Gestión Ambiental **TUANAMA VALERA JAMES FREDDY**.

Luego de la exposición y absueltas las preguntas de rigor, el Jurado Calificador procedió a emitir su fallo declarando **APROBADO** con el calificativo de **MUY BUENO**.

Acto seguido, a horas 6:45 p.m. el presidente dio por culminada la sustentación; procediéndose a la suscripción de la presente acta por parte de los miembros del jurado, quienes dejan constancia de su firma en señal de conformidad.

.....
Dr. **CÉSAR SAMUEL LÓPEZ LÓPEZ**
Presidente del Jurado

.....
Dr. **CASIANO AGUIRRE ESCALANTE**
Miembro del Jurado

.....
Ing. M.Sc. **EDILBERTO DIAZ QUINTANA**
Miembro del Jurado

.....
Dr. **LADISLAO RUIZ RENGIFO**
Asesor



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
REPOSITORIO INSTITUCIONAL DIGITAL
(RIDUNAS)

Correo: repositorio@unas.edu.pe



“Año de la unidad, la paz y el desarrollo”

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 173 - 2023 - CS-RIDUNAS

El Coordinador de la Oficina de Repositorio Institucional Digital de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El trabajo de investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Facultad:


Escuela de Posgrado UNAS

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de investigación	
-------	---	--------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
EFFECTO DE LOS HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES Y COMPOST EN LA ABSORCIÓN DE CADMIO EN PLANTAS DE ARROZ (<i>Oryza sativa L.</i>), REGIÓN SAN MARTÍN.	JAMES FREDDY TUANAMA VALERA	24% Veinticuatro

Tingo María, 28 de junio de 2023


Mg. Ing. García Villegas, Christian
Coordinador del Repositorio Institucional
Digital (RIDUNAS)

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROECOLOGÍA
MENCIÓN GESTIÓN AMBIENTAL



**EFFECTO DE LOS HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES Y COMPOST EN LA
ABSORCIÓN DE CADMIO EN PLANTAS DE ARROZ (*Oryza sativa* L.), REGIÓN SAN
MARTÍN.**

Autor	: James Freddy Tuanama Valera
Asesores	: Ing. Dr. Ladislao Ruiz Rengifo Ing. Dr. Geomar Vallejos Torres
Programa de investigación	: Gestión ambiental
Línea de investigación	: Biorremediación
Eje temático de investigación	: Cadmio, clorofila y nitrógeno
Lugar de ejecución	: Provincia y región San Martín.
Duración	: 7 meses
Financiamiento	: S/ 7 960.00

Tingo María – Perú. 2022



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACION
OFICINA DE INVESTIGACION**

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

**REGISTRO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL
GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO, INVESTIGACIÓN
DOCENTE Y TESISISTA**

I. Datos Generales de Posgrado

Universidad	: Universidad Nacional Agraria de la Selva.
Escuela de posgrado	: EPG-UNAS.
Posgrado	: Maestría ciencias en Agroecología
Mención	: Gestión Ambiental
Título de tesis	: Efecto de los hongos micorrízicos y compost en la absorción de cadmio en plantas de arroz (<i>Oryza sativa L.</i>), región San Martín)
Autor	: James Freddy Tuanama Valera.
Asesor de tesis	: Dr. Ladislao Ruiz Rengifo.
Programa de investigación	: Gestión Ambiental
Línea(s) de investigación	: Biorremediación
Eje Temático	: Cadmio, clorofila y nitrógeno
Lugar de ejecución	: Provincia y región San Martín.
Duración	: Inicio : Octubre 2021 Término : Abril 2022
Financiamiento	: FEDU : S/.0.00 Propio : S/7960.00 Otros : S/.0.00

Tingo María, Perú, mayo 2023.

James Freddy Tuanama Valera
Tesista

Dr. Ladislao Ruiz Rengifo
Asesor

DEDICATORIA

- A mis dos grandes amores, mi esposa Hanssy y a mi hijita Alessya porque física y espiritualmente me acompañaron en todo este proceso brindándome amor y dedicación y siempre animándome a no desmayar.
- A la memoria de mi padre y a mi mamita en reconocimiento a su dedicación en mi formación humana; porque fueron ellos quienes me formaron para ser un hombre de bien.
- Con mucha gratitud a mis hermanos porque en las buenas y en las malas siempre estamos apoyándonos.

AGRADECIMIENTOS

- A Dios por haberme permitido tener unos padres ejemplares.
- A mi esposa Hanssy y a mi hijita Alessya porque son el motor y motivo de mi vida.
- Al Dr. Ladislao Ruiz Rengifo, asesor del presente trabajo, por su paciencia y desinteresado apoyo para hacer realidad este libro.
- Al Dr. Geomar Vallejos Torres, Co-asesor del presente trabajo, por su conocimiento brindado en la orientación de este trabajo de investigación.
- Finalmente, expreso mi profundo agradecimiento a todas aquellas personas que, en una u otra forma, me han brindado su apoyo para la redacción de este libro.

INDICE

	Pag.
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivo general.....	2
1.2. Objetivos específicos.....	2
II. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	3
2.1. Origen del arroz.....	3
2.2. Descripción botánica del arroz.....	3
2.3. Producción y consumo de arroz en el Perú.....	3
2.4. Cadmio en el arroz.....	4
2.5. Efectos del cadmio en plantas.....	4
2.6. Cadmio en suelos.....	5
2.7. Simbiosis de micorrizas arbusculares en plantas.....	6
2.8. Micorrizas arbusculares y su efecto del cadmio en vegetales.....	7
2.9. Enmiendas orgánicas y su efecto del cadmio en vegetales.....	8
2.10. Efectos de los HMA en la clorofila y nitrógeno en vegetales.....	9
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
3.1. Lugar de ejecución.....	10
3.2. Equipos, materiales e instrumentos.....	11
3.2.1. Materiales de campo, vivero y laboratorio.....	11
3.3. Metodología.....	11
3.3.1. Tipo y nivel de investigación.....	11
3.3.2. Diseño de la investigación.....	12
3.3.3. Procedimiento del estudio.....	12
3.4. Tratamientos.....	17
3.5. Unidades experimentales.....	18
3.6. Identificación de las variables y su mensuración.....	18

3.6.1. Medición de parámetros de colonización micorrízica	19
3.6.2. Medición de parámetro de cadmio en raíces y tallos de plantas de arroz.....	22
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
4.1. Efecto de la colonización micorrízica en la absorción de cadmio en raíces y tallos del arroz.....	23
4.2. Efecto del compost en la absorción de cadmio en raíces y tallos del arroz	25
4.3. Efecto de los HMA y compost en el contenido de clorofila y nitrógeno en hojas de plantas de arroz.....	28
V. CONCLUSIONES.....	31
VI. PROPUESTAS A FUTURO.....	32
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla

1. Análisis de caracterización del compost	12
2. Distribución de tratamiento en el experimento	18
3. Identificación de Variables	19
4. Valores de probabilidad (P) bidireccionales que examinan los efectos de los HMA interacción con compost sobre el cadmio en la colonización micorrízica	23
5. Valores de probabilidad (P) bidireccionales que examinan los efectos de los HMA interacción con compost sobre el cadmio en raíces y brotes de arroz.	26
6. Valores de probabilidad (P) bidireccionales que examinan los efectos de los HMA interacción con compost sobre el contenido de clorofila y nitrógeno en hojas de arroz.	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura

1. Preparación del medio de crecimiento para el estudio.....	13
2. Preparación del cloruro de cadmio y aplicación al medio de crecimiento	14
3. Germinación de semillas de arroz.....	15
4. Repique de semillas de arroz	16
5. Preparación de muestras para determinación de cadmio	17
6. Muestreo de suelo rizosférico y tinción de raíces de arroz	20
7. Determinación de la colonización micorrízica	21
8. Preparación de muestras para análisis de cadmio en raíces y tallos en plantas de arroz	22
9. Prueba de Tukey de los efectos de la inoculación de HMA y compost sobre el cadmio en raíces y brotes de arroz.	24
10. Prueba de Tukey de los efectos de la inoculación del compost y HMA sobre el cadmio en raíces de arroz.	26
11. Prueba de Tukey de los efectos de la inoculación del compost y HMA sobre el cadmio en brotes de arroz.....	26
12. Prueba de Tukey de los efectos de la inoculación HMA y compost sobre el contenido de clorofila en hojas de arroz.....	28
13. Prueba de Tukey de los efectos de la inoculación HMA y compost sobre el contenido de nitrógeno en hojas de arroz	29

RESUMEN

El estudio se basó en el efecto de los hongos micorrízicos arbusculares y compost en la absorción de cadmio en plantas de arroz (*Oryza sativa* L.), región San Martín, Perú. Se preparó un sustrato en base a tres volúmenes de tierra agrícola y uno de arena esterilizada en autoclave al igual que el compost. El ensayo se conformó por dos concentraciones de Cd: 0 y 5 mg.kg⁻¹. El Cd en forma de cloruro de cadmio (CdCl₂) se incorporó al medio de crecimiento (sustrato mezclado de arena y tierra de campo). Semillas de arroz variedad conquista fueron germinadas en bandejas de vivero y a los 25 días se repicaron a maceteros de 3 kg conteniendo el medio de crecimiento detallado anteriormente, al que se le adicionaron 2000 esporas de HMA. La investigación fue de carácter experimental, conformado por un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo trifactorial: 2A (Consortios de HMA) x 2B (Compost) x 2C (Contenido de cadmio), cada tratamiento tuvo seis repeticiones, utilizándose un total de 48 plantas de arroz. Se empleó la prueba de comparación de medias de Tukey con una probabilidad de error del 5 %. Los análisis estuvieron sometidos por el lenguaje de programación R versión 4,0,2. La colonización micorrícica fue mayor cuando se aplicaron HMA a las plantas de arroz, logrando llegar a 85 %; mientras que el menor tratamiento cuando se incorporó HMA y Cd fue de 12,78%; el contenido de cadmio en raíces de arroz fue menor cuando se aplicaron esporas de hongos micorrízicos arbusculares combinado con 200 gramos de compost, mientras que el nitrógeno en los brotes mostraron diferencias significativas cuando recibieron compost y Cd, el contenido de clorofila en hojas fue mayor cuando se aplicaron HMA combinado con 200 gramos de compost con 34.30. Se concluyó que la inoculación de HMA en combinación con compost tuvo beneficios en la reducción del Cd y éste afectó el contenido de clorofila y nitrógeno en plantas de arroz.

Palabras Clave: *Cadmio, cloruro de cadmio, compost, absorción, esporas, suelo contaminado, Biomasa.*

ABSTRAC

The study was based on the effect of arbuscular mycorrhizal fungi and compost on cadmium uptake in rice plants (*Oryza sativa* L.), San Martín region, Peru. A substrate is prepared based on three volumes of agricultural soil and one of sand sterilized in an autoclave, as well as the compost. The trial consisted of two concentrations of Cd: 0 and 5 mg.kg⁻¹. Cd in the form of cadmium chloride (CdCl₂) is incorporated into the growth medium (mixed substrate of sand and field soil). Rice seeds of the conquista growth variety were germinated in nursery trays and after 25 days they were transplanted into 3 kg pots containing the previously detailed medium, to which 2000 AMF spores were added. The research was experimental in nature, made up of a completely randomized design (DCA) with a three-factor arrangement: 2A (HMA Consortia) x 2B (Compost) x 2C (Cadmium content), each treatment had six repetitions, using a total of 48 rice plants. Tukey's comparison of means test was used with a probability of error of 5%. The analyzes were submitted by the programming language R version 4.0.2. Mycorrhizal colonization was higher when AMF was applied to rice plants, reaching 85 %; while the lowest treatment when HMA and Cd were incorporated was 12.78%; the content of cadmium in rice roots was lower when spores of arbuscular mycorrhizal fungi combined with 200 grams of compost were applied, while the nitrogen in the shoots showed significant differences when it received compost and Cd, the content of chlorophyll in leaves was higher when AMF combined with 200 grams of compost with 34.30 was applied. It was concluded that the inoculation of AMF in combination with compost had benefits in the reduction of Cd and this affected the content of chlorophyll and nitrogen in rice plants.

Keywords: Cadmium, cadmium chloride, compost, absorption, spores, contaminated soil, Biomass.

I. INTRODUCCIÓN

San Martín en el territorio peruano, es una de las primeras regiones productoras de arroz bordeando el área cosechada de 101 255 ha con una productividad por hectárea de 7 t. (MINAGRI, 2017). La alta extensión de área empleada para la producción de arroz exige demanda de altas cantidades y dosis de fertilizantes y pesticidas químicos para lograr una eficiente producción. Asimismo, el cultivo de arroz demanda aproximadamente 50 kg de Nitrógeno por ha, superando en la mayoría de las zonas productoras, causando estragos y alteraciones en la estructura del suelo y los microorganismos presente en el suelo; y lo que es más grave aún contaminando los recursos agua, suelos y medio ambiente.

Los metales son considerados como contaminantes tóxicos, específicamente el cadmio que subsiste en una cantidad significativa por los fertilizantes industriales y éstos son incorporados a las zonas productoras junto con el fosforo por las exigencias del cultivo (Marcano, 2011). Poniendo en riesgo nuestro medio y afectando la salud del hombre y animales y contaminando el suelo y aguas; en consecuencia, afecta directamente a los ecosistemas y medio ambiente, ya que contrario a las enmiendas orgánicas empleadas en otros cultivos. Los fertilizantes inorgánicos son considerados como elementos con lenta o nula degradación sea química o biológicamente (Campos, 1990). El cadmio (Cd) posee una mayor movilidad y toxicidad para los organismos que otros metales pesados (He et al., 2013; Song et al., 2015). El Cd podría detectarse en cultivos que imponen graves problemas de salud (Esposito et al., 2015; Norton et al., 2015). En Perú el arroz es consumido en diferentes preparados y está presente casi en todas las comidas; por lo tanto, podría ser un riesgo para la salud ya que el cadmio se encuentra en cereales y hortalizas (Åkesson et al., 2008).

El arroz (*Oryza sativa* L.) es un alimento importante en el Perú y todo el mundo (Liu et al., 2014). De acuerdo a las predicciones, la población del mundo se incrementará en 2300 millones de personas al año 2050 y con ella la demanda de alimentos aumentará, lo cual afectará y comprometerá la seguridad alimentaria en toda la población mundial de todas las clases, sobre todo en países con mayor consumo de este cereal (FAO, 2009). El *O. sativa* es considerado hoy en día uno de los alimentos básicos en la canasta familiar de mucha importancia en la alimentación diaria en todos los hogares del Perú; es hora de buscar alternativas amigables al medio ambiente de tal manera se logren incrementar los rendimientos y asegurar la alimentación de la creciente población (FAO, 2014). Desafortunadamente, el arroz es un cultivo eficiente para la absorción de cadmio.

La bioconcentración de suelo a grano para el arroz son 0.300-1.112 (SONG et al., 2015). Algunos estudios indican que la concentración en el grano de arroz fue de hasta 0.062 ± 0.128 mg / kg (Song et al., 2017). El consumo de arroz fue la principal vía de exposición al Cd en humanos (Hu et al., 2009; Li et al., 2017; Song et al., 2017). El Cd del arroz es absorbido principalmente por las raíces del suelo. Para llegar al grano, Cd en el suelo tiene que atravesar la epidermis, la exodermis, la corteza y la endodermis antes de llegar a la xilema de la raíz (Schreiber y Franke, 2001).

Ante esta situación, los microorganismos juegan un papel preponderante al modificar las propiedades del suelo y crecimiento de la planta lo cual influyen evidentemente en la absorción de metales tóxicos. Se recomienda usar microorganismos benéficos; en esta oportunidad, se empleó los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) cuya capacidad es inmovilizar el cadmio en el sistema suelo-planta mediante mecanismos de inmovilización y adsorción de metales pesados en sus estructuras (Janeeshma et al., 2020).

1.1. Objetivo general

- Evaluar el efecto de los hongos micorrízicos arbusculares y compost en la absorción de cadmio en plantas de arroz (*Oryza sativa L.*) en vivero, región San Martín.

1.2. Objetivos específicos

- Determinar el efecto de la colonización micorrízica en la absorción de cadmio en raíces y tallos del arroz en vivero, región San Martín.
- Evaluar el efecto del compost en la absorción de cadmio en raíces y tallos del arroz en vivero, región San Martín.
- Determinar el efecto de los HMA y compost en el contenido de clorofila y nitrógeno en hojas de plantas de arroz en vivero, región San Martín.

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. Origen del arroz

La planta de *Oryza sativa* L. se remonta a 10.000 años tras, en zonas de Asia tropical y subtropical. Cultivo con gran valor comercial en la alimentación humana, considerado como el segundo alimento después del trigo en área cosechada.

Este cultivo se divide taxónomicamente de la siguiente manera, División: Magnoliophyta; Clase: Liliopsida; Orden: Poales; Familia: Poaceae (gramineae); Tribu: Oryzeae; Género: *Oryza*; Especie: *Oryza sativa* L. y *Oryza glaberrima* Steud, como las especies más importantes en el logro mundial.

El género *Oryza* cuenta con más de veinticuatro especies silvestres que crecen en suelos con abundante napa freática, aunque este cultivo se puede sembrar en muchos tipos de suelos y climas distintas sobre todo con sistema de riego y en secano. El ciclo vegetativo del arroz está condicionado por la temperatura, el periodo vegetativo en variedades tardías puede llegar hasta 180 días y 90 días en arroces precoces (Food and Agriculture Organization of the United Nations, [FAO], 2004).

2.2. Descripción botánica del arroz

Los cultivares de arroz son plantas que tienen una capacidad estructural adaptadas tanto para condición de riego como a nivel de suelos secos sin la intervención de agua continua. Su sistema radicular es muy nutrida y superficial en los suelos; formada por una raíz seminal de corta duración y muchas raíces absorbentes de nutrientes consideradas como raíces secundarias; as u vez los tallos son huecos.

El arroz es una planta monocotiledónea del grupo del género *Oryza*, dentro de la familia Poaceae. Las raíces son delgadas, fibrosas y fasciculadas, el tallo consta de nudos y entrenudos, con una longitud entre los 60 y 120 cm. En cada nudo se forma una hoja y una yema la cual a su vez puede desarrollarse en un hijo o macolla (Degiovanni Beltramo et al., 2010). Las hojas son alternas con un limbo lineal y plano. Las flores están organizadas en espiguillas que forman la panícula y el ovario maduro es el grano del arroz.

2.3. Producción y consumo de arroz en el Perú

La producción de cultivares de arroz se elevó en 3.1 % al año en los últimos 21 años, esto debido a que se incrementaron las áreas y la producción fue buena acompañado de los

precios estables del cultivo; solo viéndose afectado por el incremento de los fertilizantes necesarios que requiere el cultivo; con un 0.8 % anual por aumento en el rendimiento por hectárea (MINAGRI, 2017).

Sin embargo, aún falta incrementar las áreas y mejorar la productividad del cultivo ya que no es suficiente para cubrir la alimentación nacional e internacional debido al crecimiento vertiginoso y acelerado de la población mundial; se considera un crecimiento del 1 % anual (INEI, 2017) y mayor consumo per cápita de este cereal (de 52 a 54 kilos al año en el 2016) según Agraria.pe.

2.4. Cadmio en el arroz

El arroz (*Oryza sativa* L.) es un alimento importante en todo el mundo, especialmente en Asia (Liu et al., 2014). Desafortunadamente, el arroz tiene una eficiencia para absorber Cadmio. La bioconcentración de suelo a grano para el arroz son 0.300-1.112 (Song et al., 2015). La concentración de Cadmio en el grano de arroz es de 0.062 ± 0.128 mg / kg (Song et al., 2017).

El consumo de arroz en China se ha considerado como la principal vía de exposición del Cd a los humanos (HU et al., 2009; SONG et al., 2017). Por tal motivo es un antecedente para tener en cuenta en Perú. El Cd del arroz es absorbido principalmente por las raíces en el suelo. Para llegar el Cd al grano desde el suelo tiene que atravesar la epidermis, la exodermis, la corteza y la endodermis antes de llegar a la xilema de la raíz (Schreiber y Franke, 2001).

Luego, el cd se transloca desde la corteza de la raíz hasta la xilema. Durante este paso, la mayor parte del Cd se transloca a la xilema (alta acumulación de Cd cultivar en grano, p. ej. Anjana Dhan) o secuestrado en las vacuolas a través del transportador de membrana de vacuola HMA3 (baja acumulación de Cd cultivar en grano, p. ej. Nipponbare) (Ueno et al., 2009, 2010; Sasaki et al., 2014). Después de alcanzar a la xilema, el Cd es posteriormente distribuido a las hojas y granos (Uraguchi et al., 2009; Li et al., 2017).

2.5. Efectos del cadmio en plantas

El metal que más afecta a las plantas de cacao y cereales como el arroz es el cadmio, considerado como un metal toxico que ha generado gran interés y preocupación a nivel mundial por ser muy toxico y dañino para la salud y tiene una alta movilidad en las cadenas alimentarias (Peralta-Videa et al., 2009; Thévenod y Lee, 2013).

El cadmio (Cd) se presenta como enmiendas del suelo, muchas de ellas agregadas por el productor agrícola en el caso de los cultivares de cacao como fertilizantes fosfatados, lodos de depuradora, y cenizas de madera y, por lo tanto, pueden terminar en cultivos alimentarios (Jiao et al., 2004; LI et al., 2016). No solo se considera un problema en los suelos agrícolas; sino también es un riesgo para la salud de las personas y de los animales (Xiong et al., 2014; Zhong et al., 2015). El Cd también tiene efectos negativos en el crecimiento de las plantas, incluso en concentraciones relativamente bajas (White y Brown, 2010).

En las plantas, el Cd se acumula en diferentes tejidos; los niveles de cadmio en la planta dependen de los clones establecidos en una parcela (JI et al., 2011), y se acumulan en la planta de cacao, dependiendo de las diferentes especies vegetales presentes en el suelo como malezas (Ji et al., 2011). Sin embargo, muchos suelos tropicales en América del Sur, especialmente suelos de andesita de origen volcánico, muestran naturalmente altas concentraciones de Cd (Bansah y Addo 2016; Chávez et al., 2015).

2.6. Cadmio en suelos

El suelo es el lugar donde se concentran los metales y actúa como barrera para evitar su ingreso a la cadena alimentaria (Yasir et al., 2019); no obstante, las actividades antrópicas (minería, fundición metalúrgica y otros) han incorporado paulatinamente metales pesados del suelo al medio ambiente, provocando el incremento del nivel y contaminación de metales pesados (Sinha et al., 2013).

Se han utilizado diferentes estrategias físicas, químicas y biológicas para remediar suelos contaminados con metales pesados (Yasir et al., 2019). La fijación en el sitio por lo general se considera una técnica fiable para remediar suelos contaminados con metales debido bajo costo y fácil operación. Varios científicos han informado sobre la aplicación de enmiendas para inmovilizar el Cadmio en suelos contaminados, incluidos fosfatos, minerales arcillosos, materiales calcáreos, biorremediación, entre otros. (Cui et al., 2011). La biorremediación utiliza agentes biológicos microscópicos como por ejemplo bacterias, hongos, y algas (Zeng et al., 2017).

El deterioro de los suelos es actualmente uno de los casos ambientales más graves a nivel local, regional y mundial (Bateman y Muñoz-Rojas, 2020). Perturbaciones antropogénicas como agricultura intensiva, deforestación y actividades industriales pueden resultar en altas tasas de degradación de la tierra y el suelo en forma de compactación del suelo, fertilidad pérdida y contaminación, entre otros. Globalmente, los valores de Cadmio en el suelo

no intervenidos oscilan entre 0.01 y 2.7 mg kg⁻¹ (McLaughlin et al., 1997), mientras que en suelos intervenidos el rango se extiende hasta 10.5 mg kg⁻¹ (Chalmers et al., 2001).

Generalmente, las concentraciones de Cd en los suelos están fuertemente relacionadas con su abundancia en la roca madre. Sin embargo, Las actividades industriales o agrícolas pueden incorporar Cd al suelo, superando la capacidad del suelo, del sistema radicular y eventualmente esto resulta en la absorción por la planta. Investigaciones anteriores sobre cultivos en Suramérica evidenciaron fuerte dependencia entre Cadmio en granos y Cadmio total del suelo, y se reportó una injerencia del pH del suelo en el aumento de cadmio disponible en plantas (Argüello et al., 2019). La disponibilidad del cadmio en los suelos depende de muchas directrices, (contenido total de metales, pH, contenido de materia orgánica (MOS), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y presencia de greda) (Alloway, 2013). El pH es considerado un elemento crucial de los suelos pues genera dependencia en la movilidad y solubilidad del cadmio en el suelo y en la planta, a mayor acidez aumenta la movilidad y solubilidad de este metal y, por tanto, el riesgo de absorción por parte del sistema radicular de la planta.

2.7. Simbiosis de micorrizas arbusculares en plantas

La simbiosis con hongos micorrícicos arbusculares (HMA) se realiza superior o igual al 80 % en vegetales en los diferentes suelos de la tierra; sobre todo aquellos cultivares de pan llevar (Wipf et al., 2019).

Esta combinación favorece a los vegetales ya que mejoran la capacidad de absorber elementos nutricionales y agua fortaleciendo a las plantas y mitigando las deficiencias de nutrientes, agua, etc. (Gianinazzi et al., 2010), así mismo contrarrestan a los cambios climáticos como estrés por sequía (Symanczik et al., 2018) o toxicidad por metales pesados (Torres et al., 2018).

La simbiosis micorrízica aumenta la asimilación de nutrientes de las plantas, pero también puede aumentar la absorción de metales no esenciales (Parmar et al., 2013). Sin embargo, muchos reportes científicos hacen mención que la colonización de micorrizas proporciona a las plantas una ventaja, porque los elementos tóxicos están inmovilizados dentro del micelio o en el sistema radicular (Hildebrandt et al., 2007). La MA puede, de esta manera, reducir sustancialmente las concentraciones de Cd en los brotes de las plantas. (Zhang et al., 2018) y, por lo tanto, reducir los síntomas de estrés físico y químico, como el retraso en el crecimiento, producción de semillas.

Además, la colonización micorrízica de las raíces puede verse afectada por la presencia de metales pesados del suelo (Audet y Charest, 2006, Hildebrandt et al., 2007); donde algunas plantas altamente colonizadas por hongos micorrízicos presentan un nicho favorable de crecer en suelos con presencia de metales pesados (Audet y Charest, 2006). Por lo tanto, surge una pregunta intrigante sobre si las diferencias en la tolerancia al Cd y la acumulación entre especies de plantas depende de la variación natural en el grado de colonización de AM específico de la especie.

2.8. Micorrizas arbusculares y su efecto del cadmio en vegetales

Muchos estudios trataron de buscar alternativas biorremediadoras, cuya finalidad fue inmovilizar el cadmio en la planta. Arroz no es la excepción, pues se desarrollaron técnicas cuya finalidad fue reducir las concentraciones de cadmio en el suelo y planta y evitar que se trasloque a las hojas de la plata (Wang et al., 2009); no obstante, estas metodologías no son tan eficaces por los altos costos y la sostenibilidad de las tecnologías (Wang et al., 2009; Qiu et al., 2011).

Existen microorganismos como las bacterias, trichodermas y en especial los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) que tienen la capacidad de almacenar cadmio en sus redes de hifas emitidas entre sus estructuras miceliarias; ya que se conoce que la mayoría de las plantas generan simbiosis, por lo tanto, son dependientes de los HMA haciendo que resistan a altas concentraciones de cadmio en el suelo en comparación son aquellas plantas no micorrizadas (Liu et al., 2011; Li et al., 2016).

Muchas investigaciones han coincidido en mencionar que los HMA tienen fuerte impacto en los ecosistemas; sobre todo en el sistema suelo raíz de diferentes cultivos de pan llevar y especies forestales; por lo tanto, estos microorganismos podrían convertirse en tecnologías modernas de gran impacto ambiental en el mundo. Lo más importante de los HMA es que tienen la capacidad de retener cadmio (Vallejos-Torres et al., 2022), Por lo tanto, estos microorganismos se consideran como elementos importantes en la biofertilización, biorremediación y biocontrol en los suelos contaminados con elementos pesados (Merlos et al., 2016). Los HMA tienen estructuras filamentosas conocidas como hifas (Hildebrandt et al., 2007).

Asimismo, los HMA presentan estructuras hifales con capacidad para segregar sustancias proteicas conocidas como la glomalina de gran valor potencial para inmovilizar

metales pesados como el cadmio presente en los suelos, a pesar que la proporción que se produce solo inmoviliza < 1% del cadmio total encontrado en los suelos; sin embargo, si multiplicamos estos hongos y lo depositamos en los diferentes cultivos estaríamos fortaleciendo y mejorando la colonización micorrízica que muy bien podría actuar como una barrera eficiente para el cadmio (Lopes et al., 2016). Por lo tanto, las hifas son fundamentales en el mundo micótico por la capacidad de acumular compuestos xenobióticos evitando estar disponibles para las plantas. (Aguirre et al., 2011).

2.9. Enmiendas orgánicas y su efecto del cadmio en vegetales

Las enmiendas orgánicas en base a restos orgánicos de diferentes procedencias muestran un valor eficiente para inmovilizar el cadmio y otros metales por los vegetales, mejoran la materia orgánica, pH, capacidad de intercambio catiónico, y hacen posible la asimilación de nutrientes por la planta, reduce el carbono en los suelos y por ende mejora el crecimiento vegetativo y fenológico de las plantas, intercambio iónico, complejación y precipitación (Huaraca-Fernández et al., 2020). En suelos con presencia de cadmio es oportuno y necesario aplicar enmiendas orgánicas o compost para retener cadmio mediante la denominada estabilización in situ que a su vez implica la incorporación de enmiendas para retener metales mediante diferentes reacciones biológicas y químicas, generando así un modelo importante y económico de manera amigable con el medio ambiente (Hu et al., 2016). El compost, generalmente atrapa el Cd en el suelo por agentes estabilizadores (Tajudin et al., 2016).

Casi la totalidad de los abonos orgánicos “enmiendas” (e.g., compost, humus) reducen el Cd presente para las plantas, sean estas mediante la adsorción, precipitación y los procesos de formación de complejos. Asimismo, estos abonos promueven la asimilación de los nutrientes sobre el suelo. Una característica principal de las enmiendas es que presentan lignina, celulosa, taninos y carbonatos que incrementan el potencial natural del suelo para inmovilizar metales pesados (Sebastian y Prasad, 2013).

2.10. Efectos de los HMA en la clorofila y nitrógeno en vegetales

La mejora del N en arroz es más prominente en presencia de AMF en comparación con No AMF. La inoculación de AMF en el suelo disminuye las pérdidas de N como lixiviación debido a la promoción de la formación de agregados como resultado de las secreciones orgánicas. Mejores agregados del suelo también facilitan la penetración del aire, minimizando así los efectos de las pérdidas de N por desnitrificación. Por otro lado, una fuerte correlación entre la absorción de N y el contenido de clorofila regula la actividad de la rubisco durante la fotosíntesis. Esta mejora en la fotosíntesis también depende de la tasa de asimilación de CO₂ a través de la optimización de la conductancia estomática en las plantas (Valkov et al., 2020)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

El presente estudio tuvo lugar en la ciudad de Tarapoto, ubicado en la nor oriente de Perú en la región de San Martín, con coordenadas de Longitud Oeste de 6°18'47", Latitud Sur de 06°35 '28", con una extensión de 15.04 Km² y con una altitud de 321 m.s.n.m. (MPSM, 2019).

Precipitación

Tarapoto presenta una precipitación al año entre 1094 - 1400 mm, con un promedio según últimos reportes de 1213 mm. Existen dos épocas de precipitación; siendo las mayores entre los meses de setiembre a octubre y las más fuertes en los meses de marzo y abril (MPSM, 2019).

Clima

En cuanto a temperaturas para la ciudad de Tarapoto; se registra su máximo valor durante el mes de diciembre, llegando hasta 33.3 °C y julio con el menor registro (18 °C), en lo que va del año casi siempre fluctúa en 25.01° C; donde el clima es caluroso y semiseco siendo en las provincias de Huallaga Central como Picota las zonas más secas de la región San Martín (SENAMHI, 2019).

Fisiografía

Tarapoto está ubicada estratégicamente y en un área con una geografía no plana y laderas con pendientes pronunciadas que facilita las escorrentías permanentes de las aguas de lluvia; evitando que charcos de agua se depositen y almacenen en los recorridos de la ciudad (MPSM, 2019).

Hidrología

Tarapoto está ubicada a los alrededores a los ríos Mayo, Huallaga y muy próximo al Rio Cumbaza del cual se provee de agua captada en las cabeceras del río; asimismo, el río Cumbaza se desplaza como afluente principal al margen izquierdo de la ciudad de Tarapoto y próximamente se encuentra la quebrada Shupishiña y por la margen izquierda las quebradas Pucayacu y Ahuashiyacu y el río Shilcayo (SENAMHI, 2017).

3.2. Equipos, materiales e instrumentos

3.2.1. Materiales de campo, vivero y laboratorio

➤ Vivero

En vivero se emplearon diversos materiales que permitieron realizar con éxito las actividades de implementación, manejo y evaluación de los ensayos; dichos materiales más importantes fueron la cámara fotográfica semi profesional, palanas y machetes, tablero de apuntes, lapiceros y etiquetas para los maceteros; invernadero con malla raschael de 50% de ingreso de luz solar, bandejas germinadoras de vivero

➤ Laboratorio

Asimismo, en laboratorio se emplearon, tinta Para tinción de raíces (Parker), tamiz de 38 micras y 250 micras, placas de vidrio, probetas, centrifuga 5000 Rev. y tubos falcón, pisetas, micropipetas, baño María, microscopio para evaluar la colonización micorrízica y esporas de micorrizas arbusculares (*Claroideoglo mus sp*, *Acaulospora scrobiculata*, *Rhizoglo mus sp* y *Diversispora aurantia*)

3.3. Metodología

3.3.1. Tipo y nivel de investigación

3.3.1.1. Tipo de investigación

La investigación contó con un enfoque cuantitativo porque se recolectaron información numérica por cada variable y registrados en nota de apuntes, con un alcance experimental y descriptiva. Además, esta investigación fue aplicada debido a que evaluó el efecto de los HMA en la biorremediación del cadmio en el “arroz” (*Oryza sativa L*). Según Hernández et al. (2014), el enfoque cuantitativo permite probar hipótesis que utilizando la estadística se analizan asumiendo un control y precisión a fin de orientar los resultados y comportamientos obtenidos.

3.3.1.2. Nivel de investigación

El estudio corresponde a un nivel experimental, constituido por un diseño experimental debido a que estará conformado por tratamientos y unidades experimentales.

3.3.2. Diseño de la investigación

El estudio presentó un modelo experimental, porque comparó el efecto de los HMA y enmienda orgánica en base a compost en la absorción de cadmio y movimiento del cadmio en el suelo y partes vegetativas de la planta de arroz. Según Baena (2017), ensayos con diseños experimentales implica la manipulación de indicadores sean estas por estímulos o situaciones controladas, cuyo objetivo es dar a conocer los resultados finales generados a partir del experimento adaptado al ensayo. Además, esta investigación fue aplicada ya que se probó principios de validación del ensayo a nivel de vivero mediante la investigación científica con la finalidad de contribuir en la resolución de problemas de inmediato (Cortés y Iglesias, 2004).

3.3.3. Procedimiento del estudio

3.3.3.1. Análisis de caracterización del compost y suelos

Se realizó la determinación del contenido de cadmio en el compost, para ello se tomó 1 kg de la muestra que fue rotulado, secado y llevado al Laboratorio de Cultivo de Tejidos Vegetales para los análisis de cadmio. Los análisis iniciales de Cd nos ayudaron a determinar en nivel del metal antes de su incorporación a los tratamientos. Asimismo, se realizó la caracterización física y química del compost empleado (ver Anexo 1) y caracterización física y química de los suelos (Ver Anexo 2). Los resultados de los análisis se presentan en la tabla adjunta (Tabla 1).

Tabla 1. Análisis de caracterización del compost

Fuente	pH	CE (uS/cm)	MO (%)	N. total (%)	P (%)	K (%)
Compost	7.12	1789.23	28.63	2.12	0.129	1.59

Nota. Características del compost utilizado

3.3.3.2. Preparación y esterilización de arena, compost y tierra agrícola

Se preparó un sustrato en base a tres proporciones de tierra negra agrícola y una proporción de arena media de río. La arena fue lavada con abundante agua y lejía al 2.5 % y secada a pleno sol; inmediatamente después se esterilizó en autoclave a 131 °C x 15 lb de presión por 2 horas, luego se dejó enfriar (Figura 1). Lo mismo se realizó con la tierra agrícola y el compost; éstos fueron colocados en bolsas transparentes de cristal y colocados en autoclave

para su esterilización respectiva; y así tener un sustrato libre de agentes patógenos que pudieran alterar los resultados del estudio (Vallejos-Torres et al., 2021).

Figura 1. Preparación del medio de crecimiento para el estudio



Nota. Mezcla de medio de enraizamiento (arena, tierra agrícola y compost).

3.3.3.3. Aplicación de cloruro de cadmio y remoción de sustratos contaminados

Existen reportes de concentraciones de Cd con $0,83 \pm 0,83$ y $1,10 \pm 0,53$ mg.kg⁻¹ en algunos países como Canadá (Jane frances et al., 2016); valores muy similares al cultivo de cacao encontrados en Perú; en razona a ello y tomando como referencia a estudios anteriores (Vallejos-Torres et al., 2021, 2022) se planeó emplear concentraciones de cadmio: 0 y 5 mg.kg⁻¹. El cadmio en forma de cloruro de cadmio (CdCl₂) disuelto en agua se mezcló cuidadosamente con el sustrato preparado. A partir de una solución madre de cadmio se llevó a cabo la formulación de la dosis requerida para la incorporación al sustrato, empleando la fórmula de concentración: $C1xV1=C2xV2$. Los sustratos fueron pesados en bolsas de cristal de 12 x 16 pulgadas a razón de 3 kg/bolsa, posteriormente se añadió el Cadmio (Figura 2). El suelo mezclado con el cadmio se secó al aire libre, y por el lapso de 60 días, se realizaron 04 remociones (cada 15 días) con la finalidad de obtener la estabilidad del contaminante (Vallejos-Torres et al., 2022).

Figura 2. Preparación del cloruro de cadmio y aplicación al medio de crecimiento



Nota. Preparación de 5 mg.kg^{-1} de cloruro de cadmio y aplicación de cloruro a medio de crecimiento (sustrato mezclado de arena y suelo agrícola colectado en campo).

3.3.3.4. Multiplicación de HMA

La masificación micorrízica se realizó en el 2020 y se emplearon cultivos hospederos como arroz y maíz que fueron germinados en cajas de madera. Las plantas fueron regadas en días alternos para cada periodo ensayado por el lapso de 80 días (Del Águila et al., 2018). Los 30 días siguiente no se regaron a las plantas generando estrés hídrico y de esa forma se estimuló la multiplicación de los Hongos Micorrízicos Arbusculares y luego llevar a cabo las evaluaciones correspondientes a 110 días. Después de este periodo se pasó a evaluar la forma de los cultivos hospedantes, cuantificación de las esporas, análisis de colonización micorrízica e identificación molecular de los inóculos de micorrizas arbusculares multiplicados.

Las esporas de hongos micorrízicos identificados genéticamente anteriormente fueron evaluadas mediante un test para conocer la viabilidad de las esporas; luego fueron contadas empleando microscopio binocular e incorporadas a cada macetero a razón de 2000 esporas, cantidad suficiente para inocular esporas de arroz.

3.3.3.5. Inoculación con hongos micorrízicos arbusculares a semillas germinadas

Las semillas de arroz de la variedad conquistan fueron desarrolladas en bandejas germinadores hasta los 25 días; estas semillas fueron sembraron en arena previamente esterilizada en autoclave a $131 \text{ }^{\circ}\text{C}$ x 15 lb de presión por 2 horas. Al cabo de 7 días se obtuvieron

las semillas germinadas bajo sombra, lográndose un desarrollo uniforme (Palencia et al., 2009). Finalmente, las semillas germinadas se repicaron en cada macetero que contenía arena esterilizada, al que se le incorporaron 2000 esporas de HMA para dar origen a la colonización en las raíces de arroz (Vallejos-Torres et al., 2021) (Figura 3). En este estudio se utilizaron especies de HMA genéticamente identificadas, siendo estas *Claroideoglossum* sp, *Acaulospora* *scrobiculata*, *Rhizoglossum* sp y *Diversispora aurantia* que fueron identificadas genéticamente en el año 2020 y que aún se sigue conservando en bancos de multiplicación empleando arroz y maíz como cultivo hospedero (Vallejos-Torres et al., 2022). Todas estas especies pertenecen al consorcio Lamas. La inoculación se desarrolló en maceteros plastificados de 3 kg cada uno con hipoclorito de sodio al 2 %, seguidamente se procedió a seleccionar y repicar las semillas de arroz germinadas uniformemente, posteriormente, se incorporó las esporas de HMA; los maceteros fueron regados uniformemente con agua tratada hasta el nivel de capacidad de campo (Vallejos-Torres et al., 2022). Finalmente se realizó la evaluación y monitoreo del crecimiento de las 48 unidades experimentales.

Figura 3. Germinación de semillas de arroz



Nota. Germinación de semillas de arroz en bandejas germinadoras con sustrato estéril.

3.3.3.6. Proceso de repique y desarrollo de plantas de arroz

Este proceso se realizó a los 25 días de haberse colocado las semillas en el sustrato estéril; los plantines fueron extraídas cuidadosamente con todo pan de tierra, para no dañar las raíces (Figura 4).

Figura 4. Repique de semillas de arroz



Nota. Repique de plántulas de arroz en medio de crecimiento e inoculación con HMA.

3.3.3.7. Proceso de sacrificio de plantas

El sacrificio se realizó a los 3 meses de edad con la ayuda de la tijera podadora desinfectada previamente con agua y alcohol y de manera constante durante el todo el proceso, se separó 02 áreas de las estructuras de las plantas de arroz (estructura radicular y aérea) (Figura 5); éstas fueron rotuladas y preparadas para luego ser llevadas al laboratorio para su análisis respectivo (ver Anexo 3 y 4). Las raíces fueron separadas en bolsas de papel; el mismo proceso siguió los brotes colectados.

Inmediatamente el material vegetal fu trasladado al Laboratorio del instituto de Cultivo de Tejidos vegetales (ICT) para los análisis correspondientes de cadmio tanto en raíces como en brotes.

Figura 5. Preparación de muestras para determinación de cadmio



Nota. Evaluación de plantas de arroz y muestreo de sistema radicular y brotes para determinación de cadmio.

3.4. Tratamientos

La investigación contó con ocho tratamientos y seis (06) repeticiones por cada tratamiento.

Conformado por un diseño experimental denominado arreglo trifactorial: 2A (Consortios de HMA) x 2B (Dosis de abono - compost) x 2C (Dosis de cadmio), haciendo un total de 08 tratamientos clasificados de la siguiente manera: T1: Sin HMA, Cd y Compost; T2: Compost; T3: Cadmio; T4: CompostxCadmio; T5: HMA; T6: HMAxCompost; T7: HMAxCadmio y T8: HMAxCadmioxCompost (Tabla 2).

Cada tratamiento estuvo constituido por seis maceteros de prolipropileno color naranja; en cada macetero se realizó el trasplante de ocho (08) plantas de arroz que después fueron raleadas y quedaron cuatro (04) plantas de arroz.

Tabla 2. Distribución de tratamiento en el experimento

Tratamiento	HMA	Compost (g)	Cadmio (mg kg⁻¹)
T ₁	Sin HMA	0	0 (Control)
T ₂	Sin HMA	200	0
T ₃	Sin HMA	0	5
T ₄	Sin HMA	200	5
T ₅	Con HMA	0	0
T ₆	Con HMA	200	0
T ₇	Con HMA	0	5
T ₈	Con HMA	200	5

Fuente: Elaboración Propia (2022)

3.5. Unidades experimentales

En el trabajo de investigación se utilizó 48 unidades experimentales y cada unidad experimental estuvo conformado por un macetero con 8 plantas cada macetero; distribuidos en razón a seis maceteros por tratamiento.

El ensayo se llevó a cabo en maceteros plastificados de 3 kg cuyos sustratos fueron contaminados con cadmio en forma de cloruro de cadmio (CdCl₂), por un tiempo de 120 días. Durante este periodo, las plantas fueron regadas con agua tratada a niveles de capacidad de campo; el objetivo fue mantener la humedad en el sustrato de forma uniforme y así llegar a dispersar el cadmio; y a la vez, generar condiciones para el manejo de los hongos micorrízicos depositados.

3.6. Identificación de las variables y su mensuración

En esta sección se muestra la Tabla 3 con los variables identificados, graficadas de acuerdo a los objetivos específicos; además, se visualiza los medios de registro (metodologías) y unidades de medida para cada variable evaluado.

Las variables identificadas con respecto a los objetivos específicos son: Colonización micorrízica en la absorción de cadmio en raíces y tallos del arroz en vivero, efecto del compost en la absorción de cadmio en raíces y tallos del arroz en vivero y efecto de los HMA y compost en el contenido de clorofila y nitrógeno en hojas de plantas de arroz en vivero.

Tabla 3. Identificación de Variables

Determinar el efecto de la colonización micorrízica en la absorción de cadmio en raíces y tallos del arroz en vivero.			
Variable abstracta	Variable concreta	Medio de registro	Unidad de medida
Colonización micorrízica	Suelo rizosférico de arroz	Metodología de Brundrett <i>et al.</i> (1984).	%
Evaluar el efecto del compost en la absorción de cadmio en raíces y tallos del arroz en vivero.			
Variable abstracta	Variable concreta	Medio de registro	Unidad de medida
Cadmio	Suelos de plantas de arroz	Método de EPA 3050B.	mg kg ⁻¹
Cadmio	Tallos de plantas de arroz	Digestión: HNO ₃ /espectr. Absorción Atómica	mg kg ⁻¹
Determinar el efecto de los HMA y compost en el contenido de clorofila y nitrógeno en hojas de plantas de arroz en vivero, región San Martín			
Variable abstracta	Variable concreta	Medio de registro	Unidad de medida
Contenido de clorofila	Hojas de plantas de arroz	Minolta SPAD-502	MJ m ⁻²
Contenido de N	Hojas de arroz	Kjeldhal	%

Fuente: Elaboración Propia (2022)

3.6.1. Medición de parámetros de colonización micorrízica

- **Evaluación de la colonización micorrízica**

La colonización de micorrizas se evaluó a partir de la obtención de raíces finas terciarias y/o secundarias de plantas de arroz colectados en los maceteros al culminar el ensayo; éstas fueron teñidas con tinta Parker color azul, se siguió la metodología de Phillips y Hayman, (1970) con modificaciones. El proceso consiste en extraer las raíces y depositarlas en placas con abundante agua para facilitar el desglose de las partículas de tierra adheridas a las raíces.

Lavadas las raíces se colocaron en tubos de ensayo de 16 x 150 mm con una solución de hidróxido de potasio (KOH) al 10 % a un tiempo de 180 minutos, cuyo fin fue hidratar las raíces.

Figura 6. Muestreo de suelo rizosférico y tinción de raíces de arroz



Nota. Muestreo de suelo rizosférico para evaluación de la colonización micorrícica en microscopio binocular.

Todos los tubos de ensayo se depositaron en el baño maría a 90 °C por 45 minutos facilitando el movimiento del contenido citoplasmático y aclarar las estructuras del tejido de las raíces. Extraídas las raíces del baño maría, inmediatamente se adicionó agua oxigenada (H₂O₂) de 20 volúmenes reposando por 60 segundos a la temperatura ambiente para aclarar los pigmentos de las raíces, luego se vació el agua oxigenada y se empezó con el lavado de las raíces con abundante agua a razón de tres repeticiones. Posteriormente, en cada tubo se agregó tinta azul Parker (5.7 %) cubriendo todas las muestras por un tiempo de 15 minutos a temperatura ambiente. Transcurrido el tiempo las muestras nuevamente fueron depositadas en el baño maría por 15 minutos adicionales a razón de 90 °C. Concluido el tiempo se desechó el excedente de tinta de los tubos y se lavó nuevamente en tres repeticiones las raíces con lactoglicerol. Finalmente, estas muestras se dejaron a temperatura ambiente hasta el momento de su cuantificación.

Teniendo listo las raíces teñidas con la tinta Parker, éstas fueron montadas en láminas porta objeto, para ello se depositaron en una placa todas las raíces teñidas; a partir de allí y con

una pinza metálica se colocó en dos campos un total de 20 raíces de 1.5 cm de longitud (10 raíces por cada campo), luego se colocó las laminillas cobre objeto cuidadosamente en cada lámina porta objeto, quedando listas para su evaluación en el microscopio (Figura 6). La evaluación se ejecutó en el microscopio a 10x, 20x y 40x de aumento facilitándonos la observación de la presencia y ausencia de estructuras (hifas, arbuscúlos, esporas y vesículas) de los HMA.

Se empleó la fórmula del porcentaje para obtener la colonización micorriza a partir de raíces de arroz.

$$\% CM = \frac{n}{N} \times 100$$

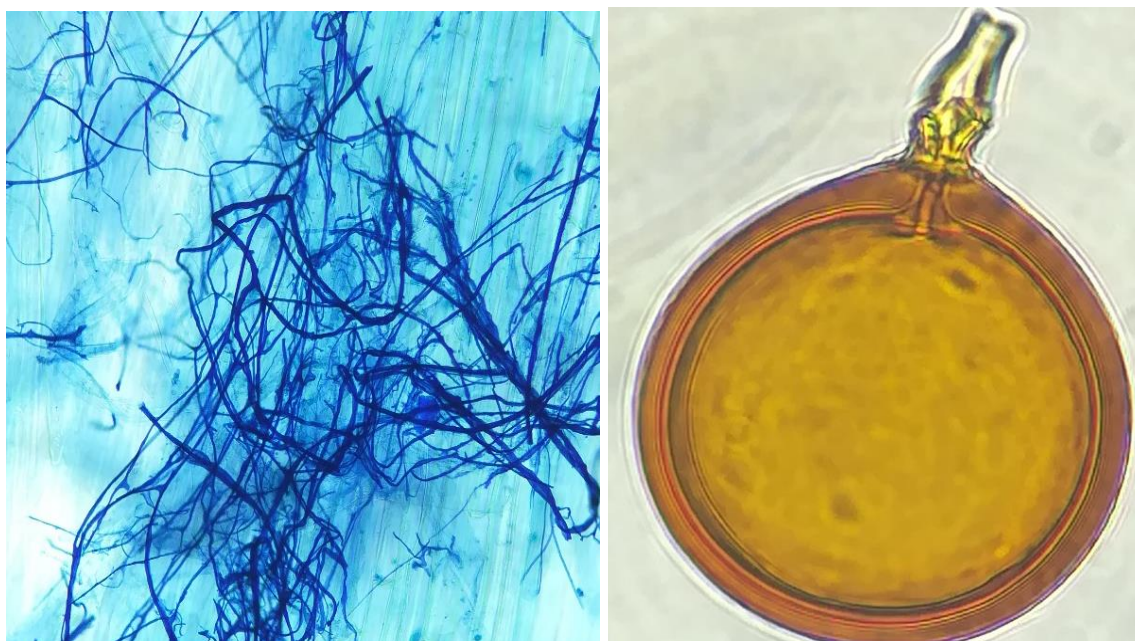
Donde:

% CM= Porcentaje de colonización micorrízica.

N= Número total de segmentos evaluados.

n= número total de zonas con presencia de estructuras micorrízicas.

Figura 7. Determinación de la colonización micorrízica



Nota. Colonización micorrízica en microscopio binocular.

3.6.2. Medición de parámetro de cadmio en raíces y tallos de plantas de arroz

- **Preparación de muestras para análisis del cadmio en raíces y tallos en plantas de arroz**

Antes de realizar los análisis de cadmio se sacrificaron las plantas de arroz a los tres meses de establecidas en los maceteros. Para el sacrificio se empleó una tijera podadora desinfectada con alcohol previamente y de manera constante durante el todo el proceso, se separó en dos partes; los tallos y el sistema radicular que fueron rotuladas y preparadas para su envío al laboratorio para su respectivo análisis (Figura 8).

Para la evaluación del cadmio en suelos se colectaron muestras de suelos por cada tratamiento en cada unidad experimental; estas fueron llevadas al laboratorio de suelos del Instituto de Cultivos Tropicales - Tarapoto, cuyas concentraciones fueron medidas en mg.kg^{-1} . De cada planta se extrajeron los suelos que fueron analizados en laboratorio, donde se determinó la concentración de cadmio. El cadmio en suelos se determinó por el método de EPA 3050B (Arévalo-Gardini *et al.*, 2016); raíces y tallos por espectroscopía de absorción atómica (Digestión HNO_3).

Figura 8. Preparación de muestras para análisis de cadmio en raíces y tallos en plantas de arroz



Nota. Muestreo de suelo, raíces y tallos para cadmio y preparación y etiquetado de muestras para su traslado al laboratorio.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Efecto de la colonización micorrízica en la absorción de cadmio en raíces y tallos del arroz.

La Tabla 4 indica que no existió interacción entre los efectos del compost incorporado al suelo sobre la colonización micorrízica. Sin embargo, este se vio afectado cuando se incorporó cadmio (Cd) y la interacción entre el cadmio (Cd) con el compost, mostrando diferencias altamente significativas.

Por lo tanto, la colonización micorrízica se vio afectada significativamente cuando se aplicaron cadmio (Cd) independientemente y la interacción de éste con 200 gramos de compost en suelos establecidos con plantas de arroz en vivero.

En resumen, la tabla 04 indica que la combinación de cadmio (Cd) y compost, interviene directamente en la colonización de los hongos micorrizas arbusculares.

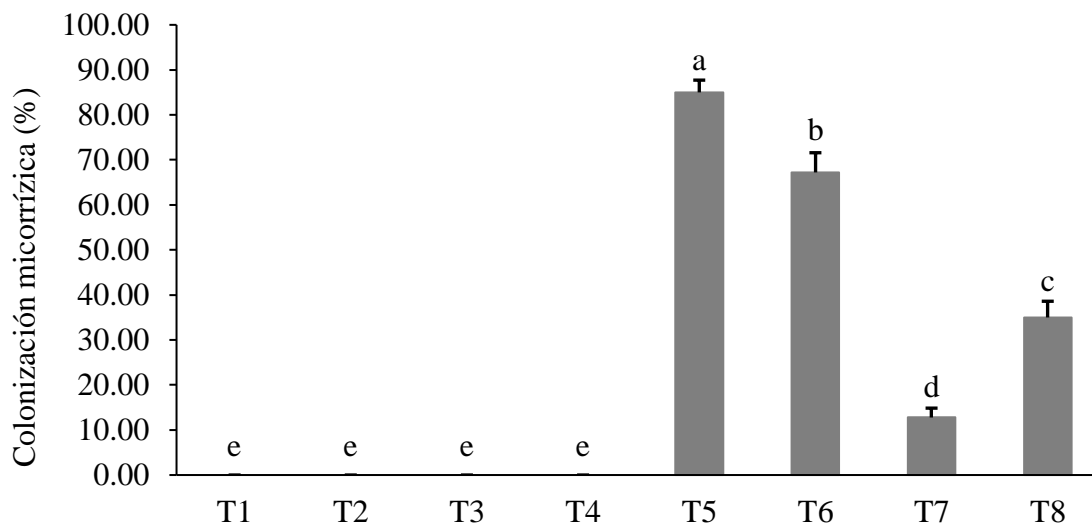
Tabla 4. Valores de probabilidad (P) bidireccionales que examinan los efectos de los HMA e interacción con compost sobre el cadmio en la colonización micorrízica.

Variables	Compost (T2)	Cd (T3)	Cd x Compost (T4)
	1,11	1,11	1,11
Colonización micorrízica	0.3702	<0.0001***	<0.0001***

p<0.001***, p<0.01**, p>0.05*

La prueba de Tukey para la colonización micorrízica (Figura 9) fue mayor cuando se aplicaron HMA a las plantas de arroz, logrando llegar a 85 % (T5) y la combinación de HMA*Compost (T6) quien obtuvo un 67.22 %; mientras que el menor tratamiento lo obtuvo el T7 cuando se incorporó HMA y Cd a 5 mgkg⁻¹ con tan solo 12.78% de colonización micorrízica. Los tratamientos sin HMA no mostraron colonización micorrízica.

Figura 9. Prueba de Tukey de los efectos de la inoculación de HMA y compost sobre el cadmio en raíces y brotes de arroz.



Nota. Las letras minúsculas indican las diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Bajo las condiciones experimentales, la tasa de infección por hongos micorrízicos arbusculares de las raíces del arroz fue mucho más alta que la reportada por Liao et al. (2003), que puede ser causado por diferentes especies de hongos y concentraciones de Cd. En condiciones de estrés por metales pesados, la inoculación de hongos micorrízicos arbusculares puede promover el crecimiento de las plantas y aumentar la absorción de Cadmio (Liu et al., 2011). Sin embargo, la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares redujo significativamente la absorción de Cd por tanto en el sistema radicular como en los brotes de plantas de arroz estudiadas; resultados cercanos a los obtenidos en maíz por Jiang et al. (2016), que indicaron que los hongos micorrízicos arbusculares alteraron la absorción y distribución del Cd del maíz. En esa investigación, la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares impidió el transporte de Cd desde las raíces a los brotes. El mecanismo por el cual los hongos micorrízicos arbusculares afectan la absorción de Cd por los brotes y las raíces en plantas de arroz puede ser el efecto de "segmentación"; tal como lo indica Wu et al. (2016); es decir el efecto de los hongos micorrízicos arbusculares sobre el Cd en diferentes espacios: los micelios de los hongos micorrízicos arbusculares absorben Cd debido a sus múltiples mecanismos de fijación y retienen una gran cantidad de Cd en la micorriza, impidiendo que el Cd no puede ser transportado de la raíz al brote (Li et al., 2016). Sin embargo, algunos estudios han encontrado que una sola inoculación con tres micorrizas arbusculares reduce el contenido de Cd y la absorción de Cd por los brotes y raíces (Liu et al., 2011). Esto también muestra que el efecto de la inoculación de hongos micorrízicos arbusculares en la absorción de Cd por las plantas

tiene resultados diferentes debido a las variedades de plantas, las condiciones de contaminación del suelo, las variedades de hongos micorrízicos arbusculares y sus diferentes combinaciones.

Si bien los hongos micorrízicos arbusculares afectan la absorción y acumulación de Cd de la planta huésped, también afectan indirectamente la cantidad de pérdida de Cd debido a la lixiviación. La inoculación con hongos micorrízicos arbusculares puede aumentar la morfología de la raíz de la planta huésped, aumentar el crecimiento de la planta huésped y aliviar los efectos tóxicos de los metales pesados (Wu et al., 2011). La morfología de la raíz afecta las propiedades físicas y químicas del suelo y la absorción de Cd de la planta, lo que a su vez afecta la lixiviación y la pérdida de Cd. Por ejemplo, las raíces pueden reducir significativamente la densidad aparente del suelo, aumentar la conductividad hidráulica saturada y la porosidad, y promover la migración de la solución del suelo (Jiang et al., 2018).

Las plantas de arroz tienen raíces finas y delgadas; capaces de absorber nutrientes y a la vez Cd; como es sabido, las raíces delgadas absorben y acumulan más fácilmente Cd. Sin embargo, el área de la superficie de la raíz, el número de ápices de la raíz, el número de ramas, el volumen de la raíz y la absorción de Cd de la raíz se correlacionaron negativamente de manera significativa, lo que puede deberse a que el hongo micorrízico arbuscular altera el transporte de Cd y retiene el Cd en las raíces (Gu et al., 2017). , Huang et al., 2017). Además, los hongos micorrízicos arbusculares aumentan los sitios de unión de metales pesados en el suelo, aumentando así adsorción de Cd en el suelo (Janouskova y Pavlikova, 2010) y pérdida de Cd por lixiviación.

4.2. Efecto del compost en la absorción de cadmio en raíces y tallos del arroz

La Tabla 5 muestra diferencias altamente significativa del compost y los HMA sobre el cadmio en el sistema radicular; mientras que el cadmio en los brotes de plantas de arroz se vio afectados significativamente con el compost y la interacción de éste con los HMA. No existió diferencias significativas de la aplicación de HMA en el contenido de Cd en los brotes.

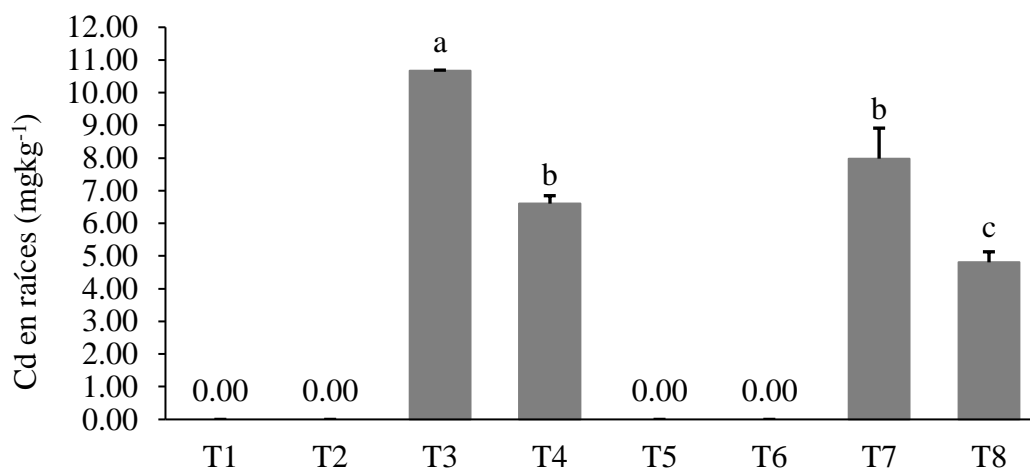
Tabla 5. Valores de probabilidad (P) bidireccionales que examinan los efectos de los HMA e interacción con compost sobre el cadmio en raíces y brotes de arroz.

Variables	Compost (T2)	HMA (T5)	HMA x Compost (T6)
	1,11	1,11	1,11
Cadmio en Raíz	<0.0001***	0.0002***	0.2462
Cadmio en brote	<0.0001***	0.7275	0.0030**

p<0.001***, p<0.01**, p>0.05

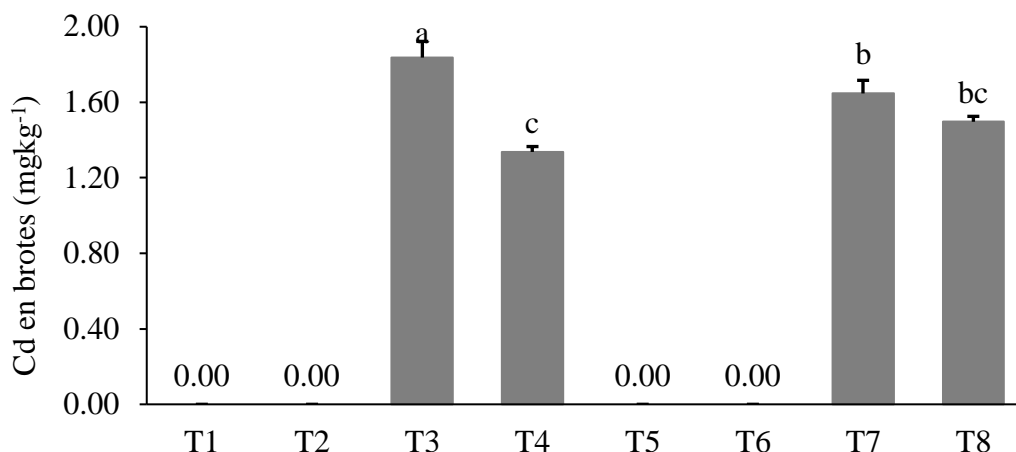
La prueba de Tukey para el contenido de cadmio en raíces de arroz (Figura 10) fue menor cuando se aplicaron esporas de hongos micorrízicos arbusculares combinado con 200 gramos de compost descompuesta en base a estiércol de gallina (T8); seguido por el tratamiento con aplicación de compost (T4), los mayores contenidos de Cd lo mostraron el tratamiento que solo recibió cadmio con 10.68 mgkg⁻¹ (T3). Asimismo, el contenido de cadmio en brotes de arroz (Figura 11) fue menor cuando se aplicaron esporas de hongos micorrízicos arbusculares con 6.60 mg.kg⁻¹ (T4) y mayor con el T3. Los tratamientos que no recibieron aplicación de Cd no mostraron contenido de este metal en las raíces y brotes en ninguno de sus tratamientos.

Figura 10. Prueba de Tukey de los efectos de la inoculación del compost y HMA sobre el cadmio en raíces de arroz.



Nota. Las letras minúsculas indican las diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Figura 11. Prueba de Tukey de los efectos de la inoculación del compost y HMA sobre el cadmio en brotes de arroz.



Nota. Las letras minúsculas indican las diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Los mecanismos de absorción y transporte de Cd en sistemas suelo-arroz han sido bien estudiados. Después de la absorción de la raíz, el xilema y el floema transfieren el Cd a los brotes y, finalmente, lo transportan a los granos (Li et al., 2017). En el presente estudio tanto la absorción de la raíz como el transporte de Cd de la raíz al brote probablemente estuvieron influenciados principalmente por las propiedades fisicoquímicas del suelo y los 5 mg.kg⁻¹ de Cd en el sistema suelo-arroz; tal como lo indica Chen et al. (2018).

Otro de los factores que influenciaron en el movimiento del Cd fue el contenido de materia orgánica obtenida en el estudio con un 28.63%; favoreciendo la fijación de metales y corroborados a la vez por lo mencionado por Zhou et al. (2018). Esta es la razón por la que se han desarrollado y aplicado numerosas enmiendas orgánicas a suelos agrícolas contaminados con metales pesados. Otra razón importante es que la adición de materiales orgánicos puede aumentar la nutrición del suelo, beneficiar el crecimiento microbiano del suelo, aumentar la actividad de las enzimas del suelo y, por lo tanto, promover el crecimiento de los cultivos (Liang et al., 2020). Sin embargo, hasta ahora, la eficiencia de las enmiendas orgánicas para inmovilizar metales pesados sigue siendo ambigua debido a sus distintas propiedades (Wu et al., 2017). Varios componentes de la MOS, como la materia orgánica disuelta y los ácidos fúlvicos/húmicos, representan simultáneamente una fuente importante y una superficie amortiguadora activa, que sirven como quelatos y, por lo tanto, aumentan la biodisponibilidad de los metales.

La variedad de arroz Conquista empleado en este estudio también influyó notablemente en la absorción de cadmio. Diferentes cultivares de arroz tienen diversas capacidades en la absorción y el transporte de Cd (Song et al., 2015), y generalmente se observa una acumulación distinta de Cd entre los cultivares de arroz en la etapa reproductiva (Zhou et al., 2019); tal como se pudo notar en este estudio pues las plantas estaban próximo a la producción de espiga. La

solubilidad del Cd del suelo puede modularse durante la absorción de Cd debido a la excreción de raíces de varios cultivares. Los cultivares que acumulan poco Cd pueden potencialmente disminuir la fitodisponibilidad de Cd en el suelo rizosférico.

4.3. Efecto de los HMA y compost en el contenido de clorofila y nitrógeno en hojas de plantas de arroz.

La Tabla 6 muestra diferencias altamente significativa del compost, Cd y los HMA sobre el contenido de clorofila en hojas de arroz; mientras de las combinaciones entre ellas no muestra diferencias significativas a excepción de la combinación entre HMA*Cd*Compost (T8). Respecto al nitrógeno en los brotes estos mostraron diferencias significativas cuando recibieron compost y Cd independientemente y significancia cuando se aplicaron HMA (T5).

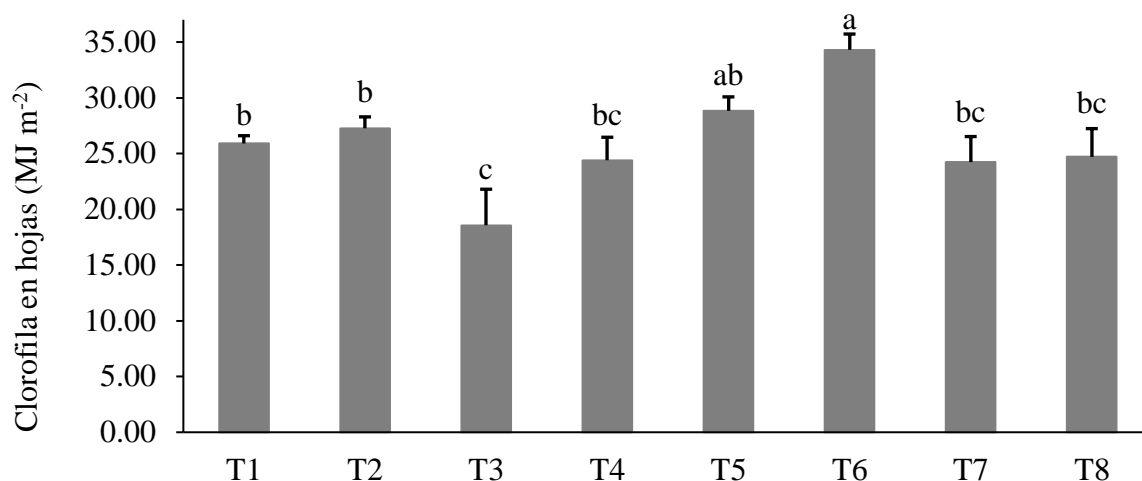
Tabla 6. Valores de probabilidad (P) bidireccionales que examinan los efectos de los HMA e interacción con compost sobre el contenido de clorofila y nitrógeno en hojas de arroz.

Variables	Compost (T2)	Cd (T3)	Cd x Compost (T4)	HMA (T5)	HMA x Compost (T6)	HMA x Cd (T7)	HMA x Cd x Compost (T8)
	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23
Clorofila	0.0044**	<0.0001***	0.8947	0.0009***	0.7535	0.3281	0.0297*
N brote	0.0004***	0.0038**	0.2695	0.0294*	0.6757	0.3979	0.3308

p<0.001***, p<0.01**, p>0.05*

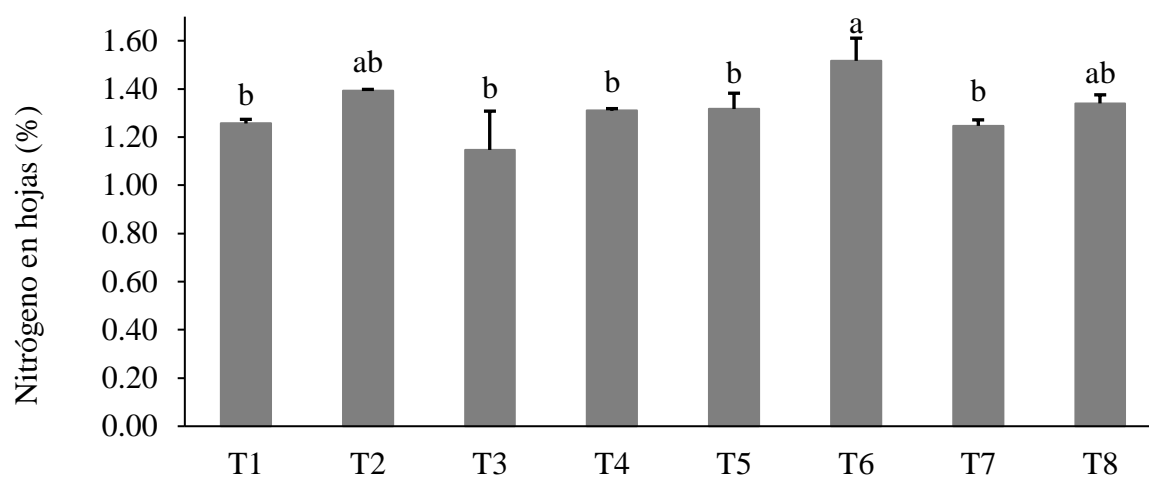
La prueba de Tukey para el contenido de clorofila en raíces de arroz (Figura 12) fue mayor cuando se aplicaron esporas de hongos micorrízicos arbusculares combinado con 200 gramos de compost descompuesta en base a estiércol de gallina (T6) con 34.30; seguido por el tratamiento con aplicación de HMA (T5), los menores contenidos de clorofila lo mostraron el tratamiento que solo recibió cadmio con 18.57 (T3). Asimismo, el contenido de nitrógeno en brotes de arroz (Figura 13) fue mayor en el T6 con 1.52% y el menor lo presentó el T3 con 1.15% de nitrógeno en hojas de plantas de arroz.

Figura 12. Prueba de Tukey de los efectos de la inoculación HMA y compost sobre el contenido de clorofila en hojas de arroz



Nota. Las letras minúsculas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Figura 13. Prueba de Tukey de los efectos de la inoculación HMA y compost sobre el contenido de nitrógeno en hojas de arroz



Nota. Las letras minúsculas indican las diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Los contenidos de N en los brotes del arroz fueron promovidos después de la aplicación de compost en los suelos contaminados con Cd. En ausencia y presencia de enmienda de compost, la adición de Cd en suelos contaminados redujo significativamente los contenidos de N en brotes y a la vez se vio incrementado con inoculación de HMA. Los mayores contenidos de clorofila lo presentaron los tratamientos que tuvieron aplicación de HMA y la combinación con compost; a la vez, las plantas de arroz expuestas al Cd mostraron inhibición el contenido de clorofila en hojas de arroz (Herath et al., 2015).

Los resultados demostraron que la toxicidad del Cadmio resultó en una reducción sustancial del contenido de clorofila en plantas de arroz; al mismo tiempo que la acumulación

de Cd en las hojas podría dañar la biosíntesis de clorofila y, por lo tanto, reducir el contenido de clorofila (Kanu et al., 2019). Para este resultado se resume que los hongos micorrízicos arbusculares estimulan la adquisición de nutrientes de la planta huésped e incrementan la síntesis de clorofila y hormonas endógenas (Mónica et al., 2017).

La pérdida de pigmentos fotosintéticos se ha observado que es una de las primeras respuestas a la toxicidad del Cd (Chen et al. 2019), fenómeno que puede deberse a la degradación de la clorofila existente y/o la inhibición de su síntesis de novo (Jain et al. 2007). Zhang et al. (2015) realizaron un experimento en plántulas de arroz con 0, 50, 100 y 200 μM Cd y encontró que el aumento concentración de Cd disminuyó significativamente el contenido de clorofila de los cultivares W7 y M63. Además de la provisión de nutrición, la aplicación de las enmiendas orgánicas también se encarga de mejorar el suelo y de mejorar la capacidad de retener agua (Zheng et al. 2017) que puede resultar en la dilución de metales en el suelo, así como una mejora en el contenido de clorofila; asimismo los HMA promovieron las concentraciones de N en los brotes. Estudios anteriores han indicado que la presencia de HMA puede facilitar absorción de elementos minerales de las plantas, (Liu et al., 2017).

V. CONCLUSIONES

1. La colonización micorrízica se vio afectada significativamente cuando se aplicaron Cd independientemente y la interacción de este con 200 gramos de compost en suelos establecidos con plantas de arroz en vivero; mientras que los tratamientos sin HMA no colonizaron las raíces.
2. El contenido de cadmio en raíces de arroz fue menor cuando se aplicaron esporas de hongos micorrízicos arbusculares combinado con 200 gramos de compost descompuesta en base a estiércol de gallina
3. Los mayores contenidos de Cd lo mostraron el tratamiento que solo recibió cadmio. Asimismo, el contenido de cadmio en brotes de arroz (Figura 10) fue menor cuando se aplicaron esporas de hongos micorrízicos.
4. El contenido de clorofila en raíces de arroz fue mayor cuando se aplicaron esporas de hongos micorrízicos arbusculares combinado con 200 gramos de compost descompuesta en base a estiércol de gallina; seguido por el tratamiento con aplicación de HMA.
5. Los menores contenidos de clorofila lo mostraron el tratamiento que solo recibió cadmio. Asimismo, el contenido de nitrógeno en brotes de arroz fue mayor en el T6 con 1.52% y el menor lo presentó el T3 con 1.15% de nitrógeno en hojas de plantas de arroz.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Fortalecer las investigaciones sobre el uso de otras variedades de arroz que se cultivan en la región San Martín y a amazonia peruana; al mismo tiempo ampliar el estudio a otras zonas de la región.
2. Ampliar el estudio con una diversidad de especies de hongos micorrícicos arbusculares (HMA) y evaluar los contenidos nutricionales, y efectos del cadmio en suelos, raíces y granos del arroz.
3. Es necesario fortalecer y buscar alianzas con otros investigadores y agencias agrarias y/o empresas o asociaciones de tal manera se puedan hacer estudios a nivel de campo en diferentes niveles altitudinales donde se cultiva el arroz de la región San Martín y otras regiones del país.
4. Realizar preparados de compost en base a estiércol de gallina y otros animales domésticos de tal manera se pueda producir arroz orgánico y minimizar los costos en base a la inmovilización del cadmio en los cultivares de arroz.
5. Ampliar los estudios de análisis de cadmio en cultivares de arroz y en diferentes zonas productoras de arroz, de tal manera se pueda determinar los niveles de cadmio presente en dichos suelos.
6. Realizar análisis de cadmio en granos de arroz destinados para consumo humano en sus diferentes variedades y comprobar si estamos ingiriendo alimentos contaminados con este metal cuyo fin sea buscar una seguridad alimentaria.
7. Para los próximos estudios, incluir la evaluación de la acumulación de cadmio que fueron asimilados tanto por los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) como por el compost luego de haber realizado el trabajo de investigación.
8. Ampliar el estudio e investigar el efecto de los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) y el compost en la absorción de cadmio a nivel de parcela demostrativa.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo, Marco A, Castrillo, Willian A, Belmonte, and Uira C. (2006). Origen, evolución y diversidad del arroz. *Agronomía Tropical*, 56(2), 151-170. Recuperado en 03 de septiembre de 2021, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2006000200001&lng=es&tlng=es.
- Aguirre, R., W., G. Fischer y T. Miranda. (2011). Tolerancia a metales pesados a través del uso de micorrizas arbusculares en plantas cultivadas. *Rev. Colomb. Cienc. Hortíc.* 5: 141-153. doi: 10.17584/rcch.2011v5i1.1260.
- Åkesson A, Julin B, Wolk A. (2008). Long-term dietary cadmium intake and postmenopausal endometrial cancer incidence: a population-based prospective cohort study. *Cancer Res.* 68:6435–6441.
- Alloway B. J. (2013). Sources of Heavy Metals and Metalloids in Soils. In: Alloway B. (eds) *Heavy Metals in Soils. Environmental Pollution*, Springer, Dordrecht. 22, 11-50. doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_2
- Arévalo-Gardini, E., Obando-Cerpa, M. E., Zúñiga-Cernades, L. B., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V. Y HE, Z. (2016). Metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres regiones del Perú. *Ecología Aplicada*, 15(2), 81-89. <https://dx.doi.org/10.21704/rea.v15i2.747>
- Argüello, D.; Chavez, E.; Lauryssen, F.; Vanderschueren, R.; Smolders, E. y Montalvo, D. (2019). Soil properties and agronomic factors affecting cadmium concentrations in cacao beans: A nationwide survey in Ecuador. *Science of the total Environment*, 649 (1), 120-127. 10.1016/j.scitotenv.2018.08.292
- Audet, P., Charest, C. (2006). Effects of AM colonisation on "wild tobacco" plants grown in zinc-contaminated soil. *Mycorrhiza* 16, 277-283.

- Bansah, K. J., and Addo, W. K. (2016). Phytoremediation potential of plants grown on reclaimed spoil lands. *Ghana Mining Journal*, 16, 68–75
- Baena, G. (2017). *Metodología de la investigación*. 3ra. edición. Grupo Editorial Patria. México. ISBN ebook: 978-607-744-748-1 (Archivo PDF). http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales_de_consulta/Drogas_de_Abuso/Articulos/metodologia%20de%20la%20investigacion.pdf
- Bateman, A. M. Y Muñoz-Rojas, M. (2019). Chapter One - To whom the burden of soil degradation and management concerns. In *Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection*. 4, 1- 22. doi.org/10.1016/bs.apmp.2019.07.001
- Brundrett, M., Bougher, N., Dell, B., Grove, T. Y Malajczuk, N. (1996) Working with mycorrhizas in forestry and agriculture. *Australian Centre for International Agricultural Research*, p. 374. <http://researchrepository.murdoch.edu.au/id/eprint/23747>
- Carballar, S., (2009). *Variación temporal de la diversidad de hongos de micorriza arbuscular y el potencial micorrízico en especies silvestres de Agave en Oaxaca*, [Tesis de posgrado]. Instituto Politécnico Nacional, Oaxaca, México]. http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx/jspui/bitstream/LITER_CIIDIROAX/79/1/CARBALLAR%20HDEZ%20SANTOS%2C%202009.pdf
- Chalmers, A.; Hounsome, B. y RUSH, C. (2001). La encuesta británica sobre la práctica de los fertilizantes. *Uso de fertilizantes en cultivos agrícolas para el año de cosecha 2000*.
- Chavez, E., He, Z. I., Stoffella, P. J., Mylavarapu, R. S., Li, Y. C., Moyano, B., and Baligar, V. C. 2015. Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador. *Science of the Total Environment*, 533, 205–214.
- Cui, L.; LI, L.; Zhang, A.; Pan, G.; Bao, D. and Chang, A. (2011). Biochar amendment greatly reduces rice Cd uptake in a contaminated paddy soil: a two-year field experiment. *BioResources*, 6(3), 2605-2618. DOI: 10.15376 / biores.6.3.2605-2618.

- Campos, C. N. (1990). La contaminación por metales pesados en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano. *Caldasia. Revista Unal*, 231-243. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/cal/article/view/35544>
- Chen, H.P., Zhang, W.W., Yang, X.P., Wang, P., Mcgrath, S.P., Zhao, F.J. (2018). Effective methods to reduce cadmium accumulation in rice grain. *Chemosphere* 207, 699–707.
- Chen, D., Xue, R., Long, J., Lin, X., Lin, Y., Jia, L., Zeng, R., Song, Y. (2019). Effects of boron, silicon and their interactions on cadmium accumulation and toxicity in rice plants. *J Hazard Mater* 367:447–455
- Cortés, M. E. y Iglesias, L. M. (2004). Generalidades de la Metodología de la Investigación. México: Universidad Autónoma del Carmen, México. (Archivo PDF). https://www.unacar.mx/contenido/gaceta/ediciones/metodologia_investigacion.pdf
- Degiovanni Beltramo, V. M., Martínez Racines, C. P., y Motta O, F. (2010). Producción eco-eficiente del arroz en América Latina. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (01 de enero de 2004). El arroz es vida. Año internacional de arroz 2004. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <http://www.fao.org/rice2004/es/kids.htm#:~:text=Para%20que%20una%20planta%20de,se%20necesita%20para%20cultivar%20arroz%3F>
- Del Águila, K.M., Vallejos-Torres, G., Arévalo, L.A. Y Becerra, A.G. (2018). Inoculación de Consorcios Micorrízicos Arbusculares en *Coffea arabica*, Variedad Caturra en la Región San Martín. *Información tecnológica*, 29(1), 137-146. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000100137>
- Esposito, M., Picazio, G., Serpe, P., Lambiase, S and Cerino, P. (2015). Content of Cadmium and Lead in Vegetables and Fruits Grown in the Campania Region of Italy. *Journal of Food Protection*, 78(9), 1760–1765, doi:10.4315/0362-028X.JFP-15-072

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2014). A regional rice strategy for sustainable food security in Asia and the Pacific. Final Edition. 52 pp.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2009. Global agriculture towards 2050: High Level Expert Forum - How to Feed the World in 2050. 4 pp.
Disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/HLEF2050_Global_Agriculture.pdf

Gianinazzi, S.; Gollotte, A.; Binet, M. N.; VAN Tuinen, D.; Redecker, D. and Wipf, D. 2010. Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza*, 20(8), 519-530. doi.org/10.1007/s00572-010-0333-3

Gonzales, H. (1982). Curso de adiestramiento en producción de arroz. Instituto Nacional de Investigación y Promoción agropecuaria (INIPA). Estación experimental Vista Florida. Chiclayo, Perú. Segunda edición. pp. 1-34. Consultado 21 Mar 2016. Disponible en: <http://agraria.pe/noticias/produccion-nacional-dearroz-crecio-558-durante-el-periodo>

Gu, H., Zhou, Z., Gao, Y., Yuan, X., AI, Y., Zhang, J., U, W., Taylor, A.A., Nan S., Li F. (2017). The influences of arbuscular mycorrhizal fungus on phytostabilization of lead/zinc tailings using of four plant species *Int. J. Phytoremediat.*, 19 (2017), pp. 739-745, 10.1080/15226514.2017.1284751

He, B., Z. Yun, J. Shi, and G. Jiang. (2013). Research progress of heavy metal pollution in China: sources, analytical methods, status, and toxicity. *Chinese Sci. Bull.* 58: 134-140.

Hernandez, R., Fernandez, C. y Baptista, P. (2014). *Metodologia de la investigacion*. Sexta Edición. ISBN: 978-1-4562-2396-0, México. (Archivo PDF). <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Methodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>

Herath, I., Kumarathilaka, P., Navaratne, A., Rajakaruna, N., & Vithanage, M. (2015). Immobilization and phytotoxicity reduction of heavy metals in serpentine soil using

- biochar. *Journal of Soils and Sediments*, 15(1), 126–138. doi:10.1007/s11368-014-0967-4.
- Hildebrandt, U., M. Regvar, and H. Bothe. (2007). Arbuscular mycorrhizal and heavy metal tolerance. *Photochemistry* 68: 139-146.
- Hu, Y., Ge, Y., Zhang, C., JU, T., and Cheng, W. (2009). Cadmium toxicity and translocation in rice seedlings are reduced by hydrogen peroxide pretreatment. *Plant Growth Regul.* 59, 51.
- Hu, Y., Cheng, H. y Tao, S. (2016). The Challenges and Solutions for Cadmium-contaminated Rice in China: A Critical Review, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.04.042>, *Environment International*, 92-93, 515–532.
- Huang, X. Ho, S. Zhu, S. Ma, F. Wu, J. Yang, J. Wang L. (2017). Adaptive response of arbuscular mycorrhizal symbiosis to accumulation of elements and translocation in *Phragmites australis* affected by cadmium stress *Environ. Manag.*, 197, pp. 448-455, 10.1016/j.jenvman.2017.04.014
- Huaraca-Fernandez, J., Pérez-Sosa, L., Bustinza-Cabala, L. S., y Pampa-Quispe, N. 2020. Enmiendas orgánicas en la inmovilización de cadmio en suelos agrícolas contaminados: una revisión. *Información Tecnológica*, 31(4), 139-152. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000400139>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2017). Consumo de Alimentos y bebidas Lima, En: <https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicacionesdigitales/Est/Lib1028/cap01.pdf>
- Janeeshma, E., and Puthur, J. T. (2020). Direct and indirect influence of arbuscular mycorrhizae on enhancing metal tolerance of plants. *Arch. Microbiol.* 202, 1–16. doi: 10.1007/s00203-019-01730
- Janefrances N. Ihedioha, Oguejiofo T. Ujam, Charles O. Nwuche, Nwachukwu R. Ekere & Charles C. Chime. (2016). Assessment of heavy metal contamination of rice grains (*Oryza sativa*) and soil from Ada field, Enugu, Nigeria: Estimating the human health risk,

Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 22:8, 1665-1677,
DOI: 10.1080/10807039.2016.1217390

- Janoušková, M., Pavlíková, D. (2010). Cadmium immobilization in the rhizosphere of arbuscular mycorrhizal plants by the fungal extraradical mycelium. *Plant Soil* **332**, 511–520. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0317-2>
- Jain, M., Pal, M., Gupta, P., Gadre, R. 2007. Effect of cadmium on chlorophyll biosynthesis and enzymes of nitrogen assimilation in greening maize leaf segments: role of 2-oxoglutarate. *Indian J Exp Biol* 45:385–389
- Jiang, Q.Y., Zhuo, F., Long, S.H., Zhao, H.D., Yang, D.J., YE, Z.H., Jing Y.X. (2016). Can arbuscular mycorrhizal fungi reduce Cd uptake and alleviate Cd toxicity of *Lonicera japonica* grown in Cd-added soils? *Sci. Rep.*, 6 (2016), p. 21805, 10.1038/srep21805
- Jiao, Y., Grant, C.A., and Bailey, L.D. (2004). Effects of phosphorus and zinc fertilizer on cadmium uptake and distribution in flax and durum wheat. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 84, 777-785.
- Jiang, X.J., Liu, W.J., Chen, C.F., Liu, J.Q., Yuan, Z.Q., Jin, B.C., Yu X.Y. (2018). Effects of three morphometric features of roots on soil water flow behavior in three sites in China *Geoderma*, 320, pp. 161-171, 10.1016/j.geoderma.2018.01.035
- Ji, P., Sun, T., Song, Y., Ackland, M. L., and Liu, Y. (2011). Strategies for enhancing the phytoremediation of cadmiumcontaminated agricultural soils by *Solanum nigrum* L. *Environmental Pollution*, 159, 762–768.
- Kanu, A.S., Ashraf, U., Mo, Z., Sabir, S.U., Baggie, I., Charley, C.S., Tang, X. (2019) Calcium amendment improved the performance of fragrant rice and reduced metal uptake under cadmium toxicity *Environ Sci Pollut Res Int* 26:24748–24757 doi:10.1007/s11356-019-05779-7
- Liao, J.P., Lin, X.G., Cao, Z.H., Shi, Y.Q., Wong. M.H. (2033). Interactions between arbuscular mycorrhizae and heavy metals under sand culture experiment *Chemosphere*, 50, pp. 847-853, 10.1016/S0045-6535(02)00229-1

- Liang, J., Tang, S.Q., Gong, J.L., Zeng, G.M., Tang, W.W., Song, B., Zhang, P., Yang, Z.X., Luo, Y. (2020). Responses of enzymatic activity and microbial communities to biochar/compost amendment in sulfamethoxazole polluted wetland soil. *J. Hazard. Mater.* 385, 121533.
- Liu, L.Z., Gong, Z.Q., Zhang, Y.L., Zhang Y.L. (2011). Growth, cadmium accumulation and physiology of Marigold (*Tagetes erecta* L.) as affected by arbuscular mycorrhizal fungi *Pedosphere*, 21, pp. 319-327, 10.1016/s1002-0160(11)60132-x
- Li, H., Luo, N., Li, Y.W., Cai, Q.Y., Li, H.Y., Mo, C.H., Wong, M.H. (2017). Cadmium in rice: transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures. *Environ. Pollut.* 224, 622–630.
- Li, H., N. Luo, L. J. Zhang, H. M. Zhao, Y. W. Li, Q. Y. Cai, M. H. Wong, and C. H. Mo. (2016). Do arbuscular mycorrhizal fungi affect cadmium uptake kinetics, subcellular distribution and chemical forms in rice? *Sci. Total Environ.* 571: 1183-1190. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.124.
- Liu, M., Sun, J., Li, Y., Xiao, Y. (2017). Nitrogen fertilizer enhances growth and nutrient uptake of *Medicago sativa* inoculated with *Glomus tortuosum* grown in Cd-contaminated acidic soil. *Chemosphere* 167, 204–211
- Liu, J., Qu, P., Zhang, W., Dong, Y., LI, L., and Wang, M. (2014). Variations among rice cultivars in subcellular distribution of Cd: The relationship between translocation and grain accumulation. *Environ. Exp. Bot.* 107, 25–31.
- Liu, L. Z., Z. Q. Gong, Y. L. Zhang, and P. J. LI. (2011). Growth, cadmium accumulation and physiology of marigold (*Tagetes erecta* L.) as affected by arbuscular mycorrhizal fungi. *Pedosphere* 21: 319-327. doi: 10.1016/S1002-0160(11)60132-X.
- Lopes-Leal, P., M. Varón-López, I. Gonçalves DE Oliveira Prado, J. Valentim Dos Santos, C. R. Fonsêca Sousa Soares, J. O. Siqueira, and F. M. de Souza Moreira. (2016). Enrichment

of arbuscular mycorrhizal fungi in a contaminated soil after rehabilitation. *Braz. J. Microbiol.* 47: 853-862. doi: 10.1016/j.bjm.2016.06.001.

Marcano., T. H. (2011). *La Contaminación con Cadmio en Suelos Agrícolas. La Contaminación con Cadmio en Suelos Agrícolas.* Universidad Central de Venezuela, Maracay. Obtenido de Obtenido de: http://190.169.94.12/ojs/index.php/rev_venes/article/view/1112/1040

Mclaughlin, M. J.; Maier, N. A.; Rayment, G. E.; Sparrow, L. A.; Berg, G.; Mckay, A. and Smart, M. K. (1997). Cadmium in Australian potato tubers and soils. *Journal of Environmental Quality*, 26(6), 1644-1649. doi.org/10.2134/jeq1997.00472425002600060026x

Merlos, M. A., O. Zitka, A. Vojtech, C. Azcón-Aguilar, and N. Ferrol. (2016). The arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis* differentially regulates the copper response of two maize cultivars differing in copper tolerance. *Plant Sci.* 253: 68-76. doi: 10.1016/j.plantsci.2016.09.010.

Ministerio de Agricultura y Riego. (2017). *Boletín, Informe del Arroz.* Dirección General de Políticas Agrarias. <http://minagri.gob.pe/portal/boletinde-arroz/arroz-2017>. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y RIEGO (MINAGRI). 2017. Boletín – Informe del arroz. Dirección General de Políticas Agrarias. Dirección de estudios económicos e información agraria. Lima. Informe del Arroz. Lima.

Mónica, G.R., Maryline, C.S., Katia, P., Coralie, M., Micaela, N.M., Sylvie, C., STépHane, D. (2017). Dynamics of short-term phosphorus uptake by intact mycorrhizal and non-mycorrhizal maize plants grown in a circulatory semi-hydroponic cultivation system *Front. Plant Sci.*, 8, pp. 1471-1478, 10.3389/fpls.2017.01471

Municipalidad Provincial de San Martín. (2019). *Plan de desarrollo urbano de la ciudad de Tarapoto 2019-2029* (p. 253). <http://www.mpsm.gob.pe/architrans/planespoliticas/pdu/pdu-2019-2029.pdf>

- Newman, E.I. (1996). A Method of estimating the total length of root in a sample. *Journal of Applied Ecology*, 3(1), 139-145. <https://doi.org/10.2307/2401670>
- Norton, K. N., Badrov, M. B., Barron, C. C., Suskin, N., Heinecke, A., & Shoemaker, J. K. (2015). Coronary artery disease affects cortical circuitry associated with brain-heart integration during volitional exercise. *Journal of neurophysiology*, 114(2), 835–845. <https://doi.org/10.1152/jn.00008.2015>
- Palencia, G., Gómez, R. Y Gúiza, O. (2009). Nuevas tecnologías para instalar viveros y producir clones de cacao (*Theobroma cacao* L.). Manual Técnico. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA). Bucaramanga, Colombia. 32 p. http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2016/06/Tecnolog%C3%ADas_clones_y_v%C3%ADveros.pdf
- Parmar, P., Kumari, N., and SHARMA, V. (2013). Structural and functional alterations in photosynthetic apparatus of plants under cadmium stress. *Botanical studies* 54, 45.
- Peralta-Videa, J.R., Lopez, M.L., Narayan, M., Saupe, G., and Gardea-Torresdey, J. (2009). The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: implications for the food chain. *The international journal of biochemistry and cell biology* 41, 1665-1677.
- Phillips, J.M. Y D.S. Hayman. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection, *Transactions of the British Mycological Society*, 55(1), 158–161. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)
- Qiu, Q., Y. Wang, Z. Yang, and J. Yuan. (2011). Effects of phosphorus supplied in soil on subcellular distribution and chemical forms of cadmium in two Chinese flowering cabbage (*Brassica parachinensis* L.) cultivars differing in cadmium accumulation. *Food Chem. Toxicol.* 49: 2260-2267.
- Schreiber, L., Franke, R.B. (2001). Endodermis and Exodermis in Roots. In: ELS. John Wiley & Sons, Ltd.

- Sebastian, A. and Prasad, M.N.V. 2013. Cadmium Minimization in Rice. A review, <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0152-y>, *Agronomy for Sustainable Development*, 34(1), 155–173.
- Sinha, S.; Mishra, R.K.; Sinam, G.; Mallick, S. and Gupta, A.K. (2013). Evaluación comparativa del potencial de fitorremediación de metales de árboles, pastos y plantas con flores de suelos contaminados con aguas residuales de tenerías en relación con las propiedades fisicoquímicas. *Contaminación del suelo y los sedimentos: una revista internacional*, 22 (8), 958-983.
- SENAMHI. (2017). *Boletín de sequía nacional - Diciembre 2017*.
- SENAMHI - Perú. (2019). <https://www.senamhi.gob.pe/?p=pronostico-detalle-turistico&localidad=0023>
- Song, W., Chen, S., Liu, J., Chen, L., Song, N., Li, N., and Liu, B. (2015). Variation of Cd concentration in various rice cultivars and derivation of cadmium toxicity thresholds for paddy soil by species-sensitivity distribution. *J. Integr. Agric.* 14, 1845–1854.
- Song, Y., Wang, Y., Mao, W., Sui, H., Yong, L., Yang, D., Jiang, D., Zhang, L., and Gong, Y. (2017). Dietary cadmium exposure assessment among the Chinese population. *PLoS One* 12, e0177978.
- Symanczik, S.; Lehmann, MF; Wiemken, A.; Boller, T. y Courty, Pe. (2018). Efectos de dos aislados de hongos micorrízicos arbusculares contrastados sobre la absorción de nutrientes por *Sorghum bicolor* en condiciones de sequía. *Micorrizas*, 28 (8), 779-785. doi.org/10.1007/s00572-018-0853-9
- Tajudin, S.A., Azmi, M.A. y Nabila, A.T. (2016). Stabilization/Solidification Remediation Method for Contaminated Soil: A Review, <https://doi.org/10.1088/1757-899x/136/1/012043>, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 136, 1-6.

- Thévenod, F., and Lee, W.K. (2013). Toxicology of cadmium and its damage to mammalian organs. In: Sigel, A., Sigel, H., Sigel, R.K., 2013, eds. *Cadmium: From toxicity to essentiality*. Dordrecht: Springer 415-490.
- Torres, N.; Antolín, M. C. and Goicoechea, N. (2018). Arbuscular mycorrhizal symbiosis as a promising resource for improving berry quality in grapevines under changing environments. *Frontiers in Plant Science*, 9, 897. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00897>
- Ueno, D., Koyama, E., Kono, I., Ando, T., Yano, M., and Ma, J.F. (2009). Identification of a novel major quantitative trait locus controlling distribution of Cd between roots and shoots in rice. *Plant Cell Physiol.* 50, 2223–2233.
- Uraguchi, S., Mori, S., Kuramata, M., Kawasaki, A., Arao, T., and Ishikawa, S. (2009). Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice. *J. Exp. Bot.* 60, 2677–2688.
- Vallejos-Torres, G., Ruíz-Valles, R., Chappa-Santa María, C. E., Gaona-Jiménez, N. Y Marín, C. (2022). High genetic diversity in arbuscular mycorrhizal fungi influence cadmium uptake and growth of cocoa plants. *Bioagro*, 34(1), 75-84. <https://doi.org/10.51372/bioagro341.7>
- Valkov VT, Sol S, Rogato A, Chiurazzi M. La caracterización funcional de LjNRT2. 4 indica un nuevo papel positivo del nitrato para una actividad eficiente de fijación de N₂ en los nódulos. *Fitol nuevo*. 2020;228: 682–696.
- Vallejos-Torres, G., Espinoza, E., Marín-Díaz, J. Solis, R. Y Arévalo, L. (2021). The Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Against Root-Knot Nematode Infections in Coffee Plants. *J Soil Sci Plant Nutr* 21, 364–373 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00366-z>
- Wang, J., J. Yuan, Z. Yang, B. Huang, Y. Zhou, J. Xin, Y. Gong, and H. YU. (2009). Variation in cadmium accumulation among 30 cultivars and cadmium subcellular distribution in 2

- selected cultivars of water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.). *J. Agric. Food Chem.* 57: 8942-8949. doi: 10.1021/jf900812s.
- White, P.J. and Brown, P.H. (2010). Plant nutrition for sustainable development and global health, *Annals of Botany*, Volume 105, Issue 7, June 2010, Pages 1073–1080, <https://doi.org/10.1093/aob/mcq085>
- Wipf, D.; Krajinski, F.; Van Tuinen, D.; Recorbet, G. and Courty, P. E. (2019). Trading on the arbuscular mycorrhiza market: from arbuscules to common mycorrhizal networks. *New Phytologist*, 223(3), 1127-1142. <https://doi.org/10.1111/nph.15775>
- Wu, S.L., Zhang, X., Chen, B.D., Wu, Z.X., Li, T., Hu, Y.J., Sun, Y.Q., Wang Y.S. (2016). Chromium immobilization by extraradical mycelium of arbuscular mycorrhiza contributes to plant chromium tolerance *Environ. Exp. Bot.*, 122 (2016), pp. 10-18, 10.1016/j.envexpbot.2015.08.006
- Wu, W.C., Wu, J.H., Liu, X.W., Chen, X.B., Wu, Y.X., Yu, S.X. (2017). Inorganic phosphorus fertilizer ameliorates maize growth by reducing metal uptake, improving soil enzyme activity and microbial community structure. *Ecotox. Environ. Saf.* 143, 322–329.
- Wu, Q.S., Li G.H., Zou Y.N. (2011). Improvement of root system architecture in peach (*Prunus persica*) seedlings by arbuscular mycorrhizal fungi, related to allocation of glucose/sucrose to root *Not. Bot. Horti Agrobot. Cluj. Napoca*, 39, pp. 232-236, 10.15835/nbha3926232
- Xiong, T., Leveque, T., Shahid, M., Foucault, Y., Mombo, S. and Dumat, C. 2014. Lead and cadmium phytoavailability and human bioaccessibility for vegetables exposed to soil or atmospheric pollution by process ultrafine particles. *Journal of environmental quality*. 43, 1593-1600.
- Yasir, H.; Lin, T.; Muhammad, I.; BILAL, H.; Muhammad, Z.; Muhammad, U.; Zhen-LI, H. and Xiaoe, Y. (2019). An explanation of soil amendments to reduce cadmium Phyto availability and transfer to food chain. *Sci. Total. Environ.* 660, 80–96. DOI: 10.1016 / j.scitotenv.2018.12.419

- Zeng, X.; Wu, L.; Li, W.; Zhu, S.; Wei, B.; Tang, J. and Tan, Y. (2017). Caracterización de la cepa *Cupriavidus* sp. zsk y su biosorción de iones de metales pesados. *Revista de materiales de base biológica y bioenergía*, 11 (2), 154-158. doi.org/10.1166/jbmb.2017.1649
- Zhang, Y., Hu, J., Bai, J., Wang, J., Yin, R., Wang, J. and Lin, X. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate the heavy metal toxicity on sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants cultivated on a heavily contaminated field soil at a WEEE-recycling site. *Science of The Total Environment*. 628, pp.282-290
- Zhang X, Chen H, Jiang H, Lu W, Pan J, Qian Q, Xue D. (2015). Measuring the damage of heavy metal cadmium in rice seedlings by SRAP analysis combined with physiological and biochemical parameters. *J Sci Food Agric* 95:2292–2298
- Zhong, M.S., Jiang, L., Han, D., Xia, T.X., Yao, J.J., Jia, X.Y., and Peng, C. (2015). Cadmium exposure via diet and its implication on the derivation of health-based soil screening values in China. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*. 25, 433.
- Zhou, T., Wu, L.H., Luo, Y.M., Christie, P. (2018). Effects of organic matter fraction and compositional changes on distribution of cadmium and zinc in long-term polluted paddy soils. *Environ. Pollut.* 232, 514–522.
- Zhou, Y.J., Jia, Z.Y., Wang, J.X., Chen, L., Zou, M.M., LI, Y., Zhou, S.L. (2019). Heavy metal distribution, relationship and prediction in a wheat-rice rotation system. *Geoderma* 354, 113886.
- Zheng, R., Sun, G., LI, C., Reid, B.J., Xie, Z., Zhang, B., Wang, Q. (2017). Mitigating cadmium accumulation in greenhouse lettuce production using biochar. *Environ Sci Pollut Res* 24:6532–6542. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8282-9>

ANEXOS

Anexo 1. Caracterización física y química del compost empleado en el estudio

Parámetros medidos	Contenido
pH	7.12
Conductividad eléctrica (uS/cm)	1789.23
Materia Orgánica (%)	28.63
Nitrógeno total (%)	2.12
Fósforo P (%)	0.129
Potasio K(%)	1.59
Calcio Ca (%)	0.035
Magnesio Mg (%)	0.014

Anexo 2. Caracterización física y química del sustrato empleado en el estudio

N°	Análisis mecánico			Clase Textural	pH	C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$	M.O. %	N %	P ppm	K ppm	CIC	Cationes Cambiables (meq/100g)						% Sat. Bas.	% Aci. Inter
	% Arena	% Arcilla	% Limo									Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺³	Al ⁺³ +H ⁺¹		
T3R5	76.8	12.4	10.8	F Arenoso	7.19	275.6	1.71	0.1	7.12	115.36	8.1	7.21	0.31	0.3	0.3	0	0	100	0.00

pH	C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$	% M.O.	% N	P ppm	K ppm	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	Al ⁺³	Al ⁺³ +H ⁺
7.19	275.63	1.71	0.07695	7.12	115.36	7.21	0.31	0.28	0	0
Neutro	No hay problemas de sales	Bajo	Bajo	Medio	Medio	Bajo	Muy bajo	Muy bajo		

d.a \rightarrow 1.55 t/m³

Clasificación del suelo	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Clasificación	% M.O.	ppm P	ppm K	Escala de pH	pH
No hay problemas de sales	<2000	Bajo	< 2	< 7	< 100	Extremadamente ácido	< 4.5
Ligeros problemas de sales	2000 - 4000	Medio	2.0 - 4.0	7.0 - 10.0	100 - 240	Fuertemente ácido	> 4.5 - 5.4
Medios problemas de sales	4000 - 8000	Alto	> 4	> 14	> 240	Moderadamente ácido	> 5.4 - 6.5
Fuerte problemas de sales	8000 - 16000					Neutro	> 6.5 - 7.3
Muy fuertemente salino	> 16000					Moderadamente alcalino	> 7.3 - 8.3
						Fuertemente alcalino	> 8.3

N°	Análisis mecánico			Clase Textural	pH	C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$	M.O. %	N %	P ppm	K ppm	CIC	Cationes Cambiables (meq/100g)						% Sat. Bas.	% Aci. Inter
	% Arena	% Arcilla	% Limo									Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺³	Al ⁺³ +H ⁺¹		
T4R1	78.4	13.4	8.2	F Arenoso	7.45	297.6	2.86	0.1	7.36	123.25	8	7.12	0.36	0.3	0.3	0	0	100	0.00

pH	C.E. $\mu\text{S}/\text{cm}$	% M.O.	% N	P ppm	K ppm	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	Al ⁺³	Al ⁺³ +H ⁺
7.45	297.56	2.86	0.1287	7.36	123.25	7.12	0.36	0.25	0	0
Moderadamente alcalino	No hay problemas de sales	Medio	Normal	Medio	Medio	Bajo	Muy bajo	Muy bajo		

d.a \rightarrow 1.54 t/m³

Clasificación del suelo	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Clasificación	% M.O.	ppm P	ppm K	Escala de pH	pH
No hay problemas de sales	<2000	Bajo	< 2	< 7	< 100	Extremadamente ácido	< 4.5
Ligeros problemas de sales	2000 - 4000	Medio	2.0 - 4.0	7.0 - 10.0	100 - 240	Fuertemente ácido	> 4.5 - 5.4
Medios problemas de sales	4000 - 8000	Alto	> 4	> 14	> 240	Moderadamente ácido	> 5.4 - 6.5
Fuerte problemas de sales	8000 - 16000					Neutro	> 6.5 - 7.3
Muy fuertemente salino	> 16000					Moderadamente alcalino	> 7.3 - 8.3
						Fuertemente alcalino	> 8.3

Anexo 3. Análisis de cadmio en raíces de plantas de arroz

REPORTE DE ANÁLISIS FOLIAR						
N° SOLICITUD	: AF010-04-22			FECHA DE MUESTREO	: 05/05/2022	
SOLICITANTE	: GEOMAR VALLEJOS TORRES			FECHA DE RECEP. LAB	: 06/05/2022	
PROCEDENCIA	: SAN MARTIN - TARAPOTO			FECHA DE REPORTE	: 24/05/2022	
TEJIDO VEGETAL	: RAIZ DE ARROZ					

ITEM	Número de Muestra			N	P	Potasio	Cadmio	
	Laboratorio		Campo					%
01	22	05	0175	T1	--	--	--	0.98
02	22	05	0176	T2	--	--	--	0.77
03	22	05	0177	T3 R1	--	--	--	10.66
04	22	05	0178	T3 R2	--	--	--	10.69
05	22	05	0179	T3 R4	--	--	--	17.40
06	22	05	0180	T4 R1	--	--	--	5.20
07	22	05	0181	T4 R2	--	--	--	4.41
08	22	05	0182	T4 R3	--	--	--	16.67
09	22	05	0183	T5	--	--	--	0.71
10	22	05	0184	T6	--	--	--	1.90
11	22	05	0185	T7 R2	--	--	--	7.35
12	22	05	0186	T7 R3	--	--	--	9.30

Anexo 4. Análisis de cadmio en hojas y tallos de plantas de arroz

REPORTE DE ANÁLISIS FOLIAR						
N° SOLICITUD	: AF010-03-22			FECHA DE MUESTREO	: 05/05/2022	
SOLICITANTE	: GEOMAR VALLEJOS TORRES			FECHA DE RECEP. LAB	: 06/05/2022	
PROCEDENCIA	: SAN MARTIN - TARAPOTO			FECHA DE REPORTE	: 24/05/2022	
TEJIDO VEGETAL	: HOJA Y TALLO DE ARROZ					

ITEM	Número de Muestra			N	P	Potasio	Cadmio	
	Laboratorio		Campo					%
01	22	05	0163	T1 R4	--	--	--	0.30
02	22	05	0164	T2	--	--	--	0.52
03	22	05	0165	T3 R3	--	--	--	1.37
04	22	05	0166	T3 R4	--	--	--	1.73
05	22	05	0167	T4 R1	--	--	--	1.46
06	22	05	0168	T4 R4	--	--	--	1.53
07	22	05	0169	T5 R1	--	--	--	0.38
08	22	05	0170	T6 R2	--	--	--	0.61
09	22	05	0171	T7 R1	--	--	--	1.30
10	22	05	0172	T7 R2	--	--	--	1.56
11	22	05	0173	T8 R1	--	--	--	1.94
12	22	05	0174	T8 R2	--	--	--	1.73

Anexo 5. Promedio de los datos de clorofila, nitrógeno y cadmio en plantas de arroz

Tratamientos	Clorofila (g)	N brote (%)	Cadmio en Raíz (ppm)	Cadmio en brote (ppm)
T1	25.90	1.26	0.00	0.00
T2	27.27	1.39	0.00	0.00
T3	18.57	1.15	10.68	1.84
T4	24.40	1.31	6.60	1.34
T5	28.83	1.32	0.00	0.00
T6	34.30	1.52	0.00	0.00
T7	24.23	1.25	7.98	1.65
T8	24.70	1.34	4.81	1.50

Anexo 6. Promedio de datos del contenido de colonización, pH, MO, CIC y P

Tratamientos	Colonización (%)	pH	MO (%)	CIC	P (ppm)
T1	0.00	6.16	1.29	5.75	4.95
T2	0.00	7.04	1.85	8.15	6.71
T3	0.00	7.10	1.92	7.70	6.84
T4	0.00	7.43	2.66	7.70	7.24
T5	85.00	7.44	2.38	8.10	7.33
T6	67.22	7.57	2.36	7.65	7.12
T7	12.78	7.42	1.42	7.00	6.89
T8	35.00	7.49	2.49	8.00	7.01