



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE GUAYAQUIL**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA**

**FITORREMEDIACIÓN DE CD Y PB EN *BATIS MARITIMA* MEDIANTE LA  
INOCULACIÓN DE MICORRIZAS ARBUSCULARES PROVENIENTES DE TRES  
ZONAS COSTERAS**

*Trabajo de titulación previo a la obtención  
del título de Ingeniero (a) en Biotecnología*

**AUTORES:**

PABLO ARIEL ZALDIVAR ALEJANDRO  
DANIELA PRISCILA VILLALTA VILLAMAR

**TUTORES:**

MSc. JAIME ALBERTO NARANJO MORAN

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

**2025**

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN**

Nosotros, **Pablo Ariel Zaldívar Alejandro** con documento de identificación N° 0942936774  
y **Daniela Priscila Villalta Villamar** con documento de identificación N° 0953615911;  
manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro  
la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total  
o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 31 enero del año 2025

Atentamente,

---

Pablo Ariel Zaldívar Alejandro  
CI: 0942936774

---

Daniela Priscila Villalta Villamar  
CI: 0953615911

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, **Pablo Ariel Zaldívar Alejandro** con documento de identificación N° 0942936774 y **Daniela Priscila Villalta Villamar** con documento de identificación N° 0953615911, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo experimental: **FITORREMEDIACIÓN DE CD Y PB EN BATIS MARITIMA MEDIANTE LA INOCULACIÓN DE MICORRIZAS ARBUSCULARES PROVENIENTES DE TRES ZONAS COSTERAS**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero/a en Biotecnología*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 31 enero del año 2025

Atentamente,

---

Pablo Ariel Zaldívar Alejandro

CI: 0942936774

---

Daniela Priscila Villalta Villamar

CI: 0953615911

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Jaime Alberto Naranjo Moran** con documento de identificación N° 0927155226, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **FITORREMEDIACIÓN DE CD Y PB EN *BATIS MARITIMA* MEDIANTE LA INOCULACIÓN DE MICORRIZAS ARBUSCULARES PROVENIENTES DE TRES ZONAS COSTERAS**, realizado por **Pablo Ariel Zaldívar Alejandro** con documento de identificación N° 0942936774 y **Daniela Priscila Villalta Villamar** con documento de identificación N° 0953615911, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Trabajo Experimental que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 31 enero del año 2025

Atentamente,



---

Jaime Alberto Naranjo Moran

CI: 0927155226

## **Dedicatoria Pablo Zaldívar**

A Dios, fuente de salud, guía y fortaleza en mi vida. Su luz me acompañó en cada paso de este camino.

A mi madre, María Alejandro, cuyo apoyo incondicional es mi sostén diario. Sus palabras, grabadas en mi corazón y mente: sin salud, no hacemos nada. Elevo a Dios mi agradecimiento por su salud y por la sabiduría que comparte conmigo.

A mi padre, Pedro Zaldivar, por la confianza que deposita en mí y el apoyo constante que me brinda.

A mi hermano, compañero de vida y junto a mis padres uno de los pilares fundamentales de mi ser. Su ayuda invaluable ha sido un regalo precioso en este viaje.

A todos ustedes, gracias por ser parte una vez mas de mi camino.

## **Dedicatoria Daniela Villalta**

A mis queridos padres,

Por ser mi mayor inspiración y mi fuente inagotable de amor y apoyo. Gracias por cada sacrificio, por cada palabra de aliento y por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo y la perseverancia. Sin ustedes, este logro no sería posible.

Con todo mi amor y gratitud, esta tesis es por y para ustedes.

## **Agradecimientos Pablo Zaldivar**

Mi más sincero agradecimiento a mis abuelos, cuyo amor y constante preocupación han sido una fuente de inspiración y apoyo a lo largo de mi vida.

A María Jordan, mi compañera, cuyo amor y disposición para ayudar siempre hicieron que este camino fuera más motivador y llevadero.

Un agradecimiento especial al Master Jaime Naranjo, nuestro tutor y guía en este proyecto. Su amistad, acompañamiento y sabiduría fueron esenciales para llevar este trabajo de principio a fin. Su paciencia y dedicación hicieron posible superar los desafíos y alcanzar el éxito.

A los laboratoristas, cuyo apoyo y consejos fueron invaluable. Su disposición para ayudar y compartir sus conocimientos hizo que el trabajo en el laboratorio fuera más eficiente.

A mi compañera Daniela Villalta, cuya amistad e interés desde el principio fueron un gran impulso. Su colaboración y entusiasmo hicieron que este proyecto fuera más amigable y gratificante.

En este camino lleno de desafíos y aprendizajes, un agradecimiento especial para mis compañeros por las risas, la ayuda y sobre todo su amistad, sin ustedes esta etapa no hubiera sido la misma.

## **Agradecimientos Daniela Villalta**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, Guillermo y Lady, quienes, a pesar de las adversidades, nunca dejaron de creer en mí. Su amor incondicional y apoyo constante me han dado la fuerza para seguir adelante, y su dedicación me inspira a ser mejor cada día.

A mis hermanos y cuñada, siempre dispuestos a ofrecerme su ayuda y escucharme en los momentos que más lo necesitaba, gracias por estar siempre a mi lado.

Agradezco profundamente al Msc. Jaime Naranjo, quien nos acompañó y guió con sabiduría y calidez hacia la realización de nuestro objetivo. Gracias por confiar en nuestras capacidades y por mantener siempre su fe en nosotros.

Al laboratorio Bureau Veritas departamento de metales pesados, quienes ofrecieron su total disponibilidad para ayudarnos a completar nuestro objetivo.

A mi querido amigo y compañero, Pablo Zaldivar, su motivación y compromiso fueron una fuente constante de inspiración, gracias a su energía pudimos concluir este semestre con éxito.

A Antonio y Camila, mis amigos, con quienes crecí y compartí aprendizajes, gracias por su presencia y por cada momento vivido.

De manera muy especial, quiero agradecer a mis más cercanas amistades en esta etapa, Naomi y Enrique, por su complicidad y apoyo incondicional, no solo en la universidad, sino también en los momentos personales que hemos compartido a lo largo de este camino.

Finalmente, mi gratitud a todas las personas que formaron parte de mi experiencia universitaria, sin importar si siguen o no en mi vida actualmente. Cada uno de ustedes dejó una huella que siempre recordaré.

## Resumen

La contaminación ambiental ha aumentado afectando la flora y fauna. Los metales pesados, como cadmio y plomo, persisten en los suelos y cuerpos de agua, especialmente en la costa del Guayas, debido a actividades humanas como minería y agricultura. *Batis maritima*, una planta halófito, puede absorber estos metales, adaptándose a condiciones hostiles. Su simbiosis con HMA mejora su tolerancia y capacidad de fitorremediación.

El estudio se desarrolló en tres zonas costeras: playa Varadero (Data de Posorja), playa El Pelado (General Villamil Playas) y playa Paraíso (Engabao). Se realizaron muestreos de suelo y vegetación para analizar la concentración de metales pesados con el equipo de espectroscopía de absorción atómica (EAA) y la colonización micorrízica. El diseño experimental incluyó tres tratamientos con diferentes concentraciones de Cd y Pb.

Los resultados muestran que la presencia de HMA favorece la tolerancia de *Batis maritima* a los metales pesados, con diferencias en la bioacumulación entre raíces y hojas. La densidad de las esporas es media y se identificaron especies de micorrizas predominantes y su impacto en la absorción de Cd y Pb.

Se puede concluir que la inoculación con HMA mejora la capacidad de *Batis maritima* para la fitorremediación en suelos contaminados, y sugiere ampliar investigaciones para optimizar su aplicación en la fitorremediación de suelos perturbados.

**Palabras clave:** Halófitas; Metales pesados; Hongos micorrízicos arbusculares; Cadmio, Plomo; Bioacumulación; *Batis maritima*.

## Abstract

Environmental pollution has increased affecting flora and fauna. Heavy metals, such as cadmium and lead, persist in soils and water bodies, especially along the Guayas coast, due to human activities such as mining and agriculture. *Batis maritima*, a halophytic plant, can absorb these metals, adapting to hostile conditions. Its symbiosis with AMF enhances its tolerance and phytoremediation capacity.

The study was conducted in three coastal areas: beach Varadero (Data de Posorja), beach El Pelado (General Villamil Playas), and beach Paraíso (Engabao). Soil and vegetation samples were collected to analyze heavy metal concentrations using atomic absorption spectroscopy (AAS) and assess mycorrhizal colonization. The experimental design included three treatments with different Cd and Pb concentrations.

The results show that AMF presence favors *Batis maritima* tolerance to heavy metals, with differences in bioaccumulation between roots and leaves. Spore density was moderate, and predominant mycorrhizal species were identified along with their impact on Cd and Pb absorption.

It can be concluded that AMF inoculation improves *Batis maritima* phytoremediation capacity in contaminated soils and suggests further research to optimize its application in the remediation of disturbed soils.

**Keywords:** Halophytes; Heavy metals; Arbuscular mycorrhizal fungi; Cadmium, Lead; Bioaccumulation; *Batis maritima*.

## INDICE DE CONTENIDO

<b>Capítulo 1</b> .....	<b>1</b>
<b>Antecedentes</b> .....	<b>1</b>
1.1. Introducción .....	1
1.2. Planteamiento del problema .....	2
1.3. Justificación.....	3
1.4. Objetivos .....	5
1.4.1 Objetivo general .....	5
1.4.2 Objetivos específicos.....	5
1.5 Delimitaciones.....	5
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>9</b>
<b>Marco Teórico</b> .....	<b>9</b>
2.1 Contaminación por Metales Pesados.....	9
2.1.1 Cadmio .....	9
2.1.2 Plomo .....	10
2.1.3 Situación actual en zonas costeras del Ecuador .....	11
2.2 Técnicas de análisis de metales pesados .....	12
2.2.2 Espectroscopía de absorción atómica (EAA).....	12
2.3 Fitorremediación .....	13
2.3.1 Especies fitorremediadoras .....	14
2.3.2 Factores que afectan la eficiencia.....	15
2.4. <i>Batis maritima</i> .....	16
2.4.1 Taxonomía y distribución.....	16

2.4.2 Características morfológicas .....	17
2.4.3 Potencial biorremediador .....	19
2.4.4 Hiperacumulación .....	18
2.5 Hongos micorrízicos arbusculares (HMA) .....	19
2.5.1 Simbiosis planta-HMA.....	19
2.5.2 Rol en la tolerancia a metales pesados .....	20
<b>Capítulo 3.....</b>	<b>21</b>
<b>Materiales y métodos .....</b>	<b>21</b>
3.1 Área de estudio.....	21
3.1.1 Estuarios .....	21
3.1.2 Características edafoclimáticas.....	23
3.2 Material biológico .....	23
3.2.1 Colecta de <i>B. maritima</i> .....	23
3.2.2 Obtención de inóculos de HMA.....	23
3.2.3 Preparación de solución nutritiva.....	24
3.3 Diseño experimental.....	25
3.3.1 Tratamientos.....	25
3.3.2 Variables de estudio .....	26
3.4 Procedimientos analíticos.....	27
3.4.1 Caracterización de esporas de micorrizas presente en sistema radicular ....	27
3.4.2 Tinción de raíces .....	27

3.4.3 Determinación de metales pesados .....	28
3.4.4 Determinación de factores de bioconcentración, translocación y porcentaje de retención. ....	32
<b>Capítulo 4.....</b>	<b>34</b>
<b>Resultados y discusión .....</b>	<b>34</b>
4.1 Caracterización inicial HMA .....	34
4.1.1 Diversidad de HMA nativos en plantas halófitas.....	34
4.1.2 Estructuras micorrízicas iniciales.....	36
4.2 Determinación inicial de metales .....	37
4.1.1 Cuantificación de Cd y Pb para muestras iniciales .....	37
4.3 Efecto de la simbiosis.....	40
4.3.1 HMA en los tratamientos .....	40
4.3.2 Colonización micorrízica .....	44
4.4 Bioacumulación de metales.....	45
4.4.1 Acumulación en raíces .....	45
4.4.2 Translocación a tejidos aéreos.....	47
4.4.3 Factores de bioconcentración .....	48
4.4.4 Efecto de la tolerancia a metales .....	50
4.5 Desarrollo vegetal .....	51
4.5.1 Parámetros de crecimiento .....	51
<b>Capítulo 5.....</b>	<b>52</b>
<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>53</b>
5.1 Conclusiones .....	53

5.2 Recomendaciones.....	54
<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>55</b>
<b>Anexo de tablas.....</b>	<b>71</b>
<b>Anexo de figuras.....</b>	<b>92</b>

## Índice de figuras

Figura 1. Zona de muestreo.....	7
Figura 2. <i>B. maritima</i> . .....	18
Figura 3. Recolección de <i>B. maritima</i> .. .....	23
Figura 4. MS, MR, MF posterior al proceso de digestión.....	29
Figura 5. Esporas de HMA nativos de plantas <i>B. marítima</i> .....	34
Figura 6. Raíces teñidas de General Villamil, Engabao y Data de Posorja.....	37
Figura 7. Distribución de concentraciones de Pb por tipo de muestra y zona.. .....	38
Figura 8. Distribución de concentraciones de Cd por tipo de muestra y zona.. .....	39
Figura 9. Concentración de esporas en 10g de suelo contaminado con Cd. ....	40
Figura 10. Concentración de esporas en 10g de suelo contaminado con Pb. ....	41
Figura 11. Esporas de HMA en suelos contaminados con Cd. ....	42
Figura 12. Esporas de HMA en suelos contaminados con Pb. ....	42
Figura 13. Hifas y vesículas presentes en plantas sometidas a distintas concentraciones de Cd y Pb. ....	45
Figura 14. Niveles de Pb y Cd en raíces según dosis de tratamiento. ....	47
Figura 15. Comparación de variables por tratamiento.....	51

## Índice de tablas

Tabla 1. <i>Taxonomía de B. maritima.</i> .....	17
Tabla 2. <i>Distribución de tratamientos experimentales para la fitorremediación con B. Marítima.</i> .....	26
Tabla 3. <i>Volúmenes requeridos para la elaboración de curva de tejidos y suelos para Cd.</i> .....	30
Tabla 4. <i>Volúmenes requeridos para la elaboración de curva de tejidos y suelos para Pb.</i> .....	31
Tabla 5. <i>Condiciones instrumentales aplicadas en EAA por horno grafito.</i> .....	32
Tabla 6. <i>Efectos de los consorcios de HMA en plantas contaminadas con Cd y variables agronómicas evaluadas.</i> .....	43
Tabla 7. <i>Porcentajes de micorrización presente en cada nivel del tratamiento de Cd y Pb.</i> .....	44
Tabla 8. <i>Evaluación de fitoestabilización de metales pesados por tratamiento.</i> .....	47
Tabla 9. <i>Traslocación de Cd y Pb presente en hojas.</i> .....	48
Tabla 10. <i>Factores de bioconcentración (FBC) para cada Cd y Pb.</i> .....	49
Tabla 11. <i>Análisis post hoc de Tukey para variables morfológicas según tratamiento.</i> .....	52

## Índice de anexos

Anexo 1. <i>Tipos de halófitas y su papel potencial en la restauración de sitios contaminados con metales..</i> .....	92
Anexo 2. <i>Distribución de B. maritima en ecuador.</i> .....	92
Anexo 3. <i>Importancia de las micorrizas arbusculares en la nutrición vegetal y su contribución al crecimiento y adaptación de las plantas frente a condiciones adversas.</i> .....	93
Anexo 4. <i>Temperatura Media Mensual y Anual (°C).</i> .....	93
Anexo 5. <i>Medición de la planta con ayuda de la aplicación ImageJ</i> .....	94
Anexo 6. <i>Tratamientos con plantas contaminadas de Cd</i> .....	94
Anexo 7. <i>Tratamientos con plantas contaminadas de Pb.</i> .....	95
Anexo 8. <i>Recolección de plantas en playa El pelado – General Villamil Playas</i> .....	95
Anexo 9. <i>Salida de campo en el sector de Engabao.</i> .....	96
Anexo 10. <i>B. maritima en playa el Pelado.</i> .....	96
Anexo 11. <i>Comparación de presencia de estructuras micorrízicas en las tres zonas.</i> 97	
Anexo 12. <i>Corte de tejido radicular.</i> .....	97
Anexo 13. <i>Muestras iniciales teñidas en azul de tripano.</i> .....	98
Anexo 14. <i>Medición manual de B. maritima.</i> .....	98
Anexo 15. <i>Muestras iniciales listas para ser secadas.</i> .....	99

## Capítulo 1

### Antecedentes

#### 1.1 Introducción

A lo largo de los años la contaminación ambiental ha tenido un aumento exponencial, los diversos químicos y compuestos presentes suponen un riesgo emergente para la flora y fauna global, los metales pesados entran dentro de la lista de los compuestos tóxicos presentes en el ambiente, que a diferencia de otros, su porcentaje de descontaminación natural es baja, lo cual ocasiona que su residencia en suelos afecte de manera directa diversos organismos, que dan paso al ingreso de la cadena trófica (Navarrete-Forero et al., 2019).

En Ecuador, las actividades antropogénicas como la minería, agricultura, uso de fertilizantes y mal manejo de residuos industriales, entre otras cosas ha ocasionado que los suelos y cuerpos de agua se vean infestados de estos tóxicos, que a su vez suelen ser tener su residencia final en las zonas costeras de la provincia del Guayas, debido a que estas funcionan como sistemas receptores de varios contaminantes. Las condiciones de este ambiente obligan a las especies vegetales a adaptarse a su entorno, convirtiéndolas en especies capaces de soportar condiciones hostiles, como lo son altas concentraciones de metales pesados (Scopel et al., 2021).

Una especie bien adaptada es la planta *Batis maritima*, una planta halófila originaria de las regiones tropicales de América del Sur, siendo capaz de absorber metales pesados como el Cd y Pb con el fin de utilizarlo para su propio desarrollo (Scopel et al., 2021).

Las plantas desarrollan varias estrategias para adaptarse y tolerar la toxicidad provocada por los metales pesados que se encuentran en el suelo y el agua (Adeyemi et al., 2021). Se han comprobado que contribuyen al beneficio de las plantas, siendo uno de los métodos más relevantes para mejorar la tolerancia de las plantas al estrés por metales pesados (González-Chávez et al., 2019).

La mayor parte de las especies de plantas puede generar esta relación simbiótica al colonizar sus raíces por hongos micorrizas arbusculares. Por ende, muchas de estas especies son adecuadas para la fitorremediación de los suelos y, a su vez, se benefician de esta relación en contextos de remediación (Ma et al., 2022).

Las hifas de los hongos micorrizas arbusculares actúan como intermediarios en este proceso, lo cual es fundamental tanto para la planta como para el hongo, permitiendo la absorción de nutrientes, en particular el fósforo (P), a cambio de carbohidratos de la planta hospedante (Adeyemi et al., 2021).

En este contexto, la fitorremediación asistida por micorrizas arbusculares representa una estrategia prometedora para abordar la contaminación por metales pesados en ecosistemas costeros. El objetivo de este trabajo es proporcionar una investigación que integre aspectos ecológicos, fisiológicos y analíticos para evaluar el potencial de *B. maritima* inoculada con micorrizas arbusculares nativas para la fitorremediación de suelos contaminados con cadmio (Cd) y plomo (Pb) (Elmassry & Piechulla, 2020).

## **1.2 Planteamiento del problema**

La contaminación de suelos y cuerpos de agua por metales pesados, como el Cd y el Pb, es una problemática ambiental creciente que amenaza los ecosistemas y la salud pública. En la zona costera de la provincia del Guayas, estudios previos han identificado concentraciones alarmantes de estos metales, debido a actividades antropogénicas como la agricultura, la ganadería y la industria. Estos contaminantes tóxicos y recalcitrantes afectan de manera directa a la flora y fauna local, al generar riesgos de bioacumulación en organismos vivos, incluida la cadena alimenticia humana (Gonzalo, 2021).

En este contexto, las especies halófitas, como *B. maritima*, presentan un potencial significativo para la remediación de suelos contaminados, debido a su capacidad de tolerar condiciones adversas, acumular metales pesados y adaptarse a ambientes salinos (Scopel et al., 2021). Sin embargo, la capacidad de fitorremediación de esta especie podría potenciarse a través de la simbiosis con hongos micorrízicos arbusculares (HMA), que extienden la cobertura radicular y facilitan la absorción de nutrientes y metales pesados (Alvarado et al., 2011).

A pesar de los beneficios conocidos de la fitorremediación y el uso de HMA, son escasos los estudios que evalúan de manera integral la interacción entre *B. maritima*, los HMA y la bioacumulación de Cd y Pb en zonas costeras específicas del Ecuador. Este vacío de conocimiento limita la implementación de estrategias efectivas para la remediación ambiental en estas áreas. Por lo tanto, surge la necesidad de evaluar cómo la simbiosis entre *B. maritima* y los HMA influye en la acumulación y/o inmovilización de estos metales, para contribuir al desarrollo de soluciones sostenibles que mitiguen la contaminación de suelos y cuerpos de agua en la provincia del Guayas.

### **1.3 Justificación**

La contaminación por metales pesados constituye una problemática ambiental de gran magnitud, con implicaciones severas para los ecosistemas, la salud humana y la biodiversidad en general. Elementos como el Cd y el Pb, encontrados en zonas costeras, generan impactos negativos que amenazan la sostenibilidad de los recursos naturales (López Hernández & Morales Hernández, 2022). En el contexto ecuatoriano, la provincia del Guayas, caracterizada por actividades industriales, agrícolas y ganaderas intensivas, se enfrenta a este desafío ambiental, lo que subraya la necesidad de implementar estrategias de mitigación eficaces y sostenibles.

En este marco, la fitorremediación emerge como una solución responsable para la rehabilitación de suelos contaminados. Esta técnica aprovecha la capacidad de ciertas plantas para retener, acumular, metabolizar y estabilizar metales pesados presentes en matrices ambientales como el suelo, agua y sedimentos. A diferencia de los métodos fisicoquímicos tradicionales, la fitorremediación presenta ventajas como menores costos operativos, menor generación de residuos secundarios y un impacto ambiental reducido (De la Rosa-Pérez, Teutli-León y Ramírez-Islas, 2021).

Una de las especies con mayor potencial en este ámbito es la *B. maritima*, una planta halófila distribuida en zonas subtropicales y reconocida por su capacidad de tolerar altas concentraciones de sal y metales pesados. Además, su uso en el tratamiento de aguas residuales la posiciona como una candidata prometedora para proyectos de remediación ambiental (Duarte y Ferreira, 2022). Sin embargo, pese a sus características sobresalientes, existen pocos estudios enfocados en la interacción de esta especie con los HMA, organismos simbióticos que favorecen la absorción de nutrientes y podrían potenciar su capacidad para acumular y estabilizar metales pesados.

Se plantea que la simbiosis entre *B. maritima* y los HMA no solo mejoraría la tolerancia de la planta a condiciones ambientales adversas, sino que también incrementaría su eficacia en los procesos de fitorremediación. Esta interacción representa una oportunidad para optimizar la remediación de suelos contaminados, promoviendo un enfoque holístico para la restauración ambiental (Delgado Silva & Gutiérrez Montoya, 2022).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la interacción entre los HMA nativos y la bioacumulación de Cd y Pb en *B. maritima* en tres zonas costeras afectadas de la provincia del Guayas. A través de la caracterización de los HMA presentes, la cuantificación de los metales en los tejidos de la planta y el análisis del crecimiento vegetal

bajo condiciones semicontroladas, este trabajo busca generar evidencia científica que respalde el uso de esta simbiosis como estrategia para la remediación sostenible de suelos contaminados.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 *Objetivo general***

Determinar la eficacia de *Batis maritima* inoculada con micorrizas arbusculares nativas para la fitorremediación de Cd y Pb en zonas costeras perturbadas de la provincia del Guayas, Ecuador, evaluando la bioacumulación de metales pesados y el crecimiento vegetal en condiciones semicontroladas.

### **1.4.2 *Objetivos específicos***

Caracterizar las micorrizas arbusculares nativas presentes en *Batis maritima* en tres zonas costeras perturbadas de la provincia de Guayas, mediante la identificación morfológica y cuantificación de su colonización en las raíces.

Cuantificar las concentraciones de Cd, Pb en suelo, raíces y hojas de *Batis maritima*, mediante Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA).

Evaluar en condiciones semicontroladas, la bioacumulación de Cd y Pb en *Batis maritima* mediante la inoculación con micorrizas arbusculares nativas, analizando la concentración de metales en raíces y hojas, así como el crecimiento de la planta bajo tratamiento micorrízico.

## **1.5 Delimitaciones**

La delimitación para llevar a cabo el estudio se seleccionaron tres áreas de muestreo estratégicos en la costa ecuatoriana, cada uno seleccionado por sus características únicas que contribuyen al análisis de la calidad del suelo y microbioma. El primer sitio corresponde a Playa

Varadero, ubicada en Data de Posorja, con coordenadas -2.724068, -80.298125 (ver figura 1). Esta playa es un área de interés, debido a su dinámica costera y a la influencia del mar en las propiedades del suelo, lo que permite una evaluación de cómo estas condiciones afectan la biodiversidad microbiana y la acumulación de metales pesados en el sustrato.

El segundo sitio de muestreo es Playa El Pelado, situada en el cantón General Villamil Playas, con coordenadas -2.624824, -80.452619. Esta playa es conocida por su alta diversidad de familias botánicas, lo que proporciona un contexto ideal para estudiar la interacción entre el suelo, las raíces de las plantas y la presencia de esporas micorrízicas.

Playa Paraíso, ubicada en la parroquia Engabao, con coordenadas -2.587216, -80.482343. Este sitio presenta un entorno diverso que incluye áreas de vegetación natural y zonas alteradas por actividades humanas como son el turismo y la pesca artesanal. La recolección de raíces en esta área tiene como objetivo evaluar la presencia de micorrizas y su relación con los niveles de contaminación por metales pesados en el suelo. La selección de estos tres puntos permite una comparación integral que facilitará el análisis de los efectos ambientales sobre la microbiología del suelo y la salud ecológica de las playas estudiadas.

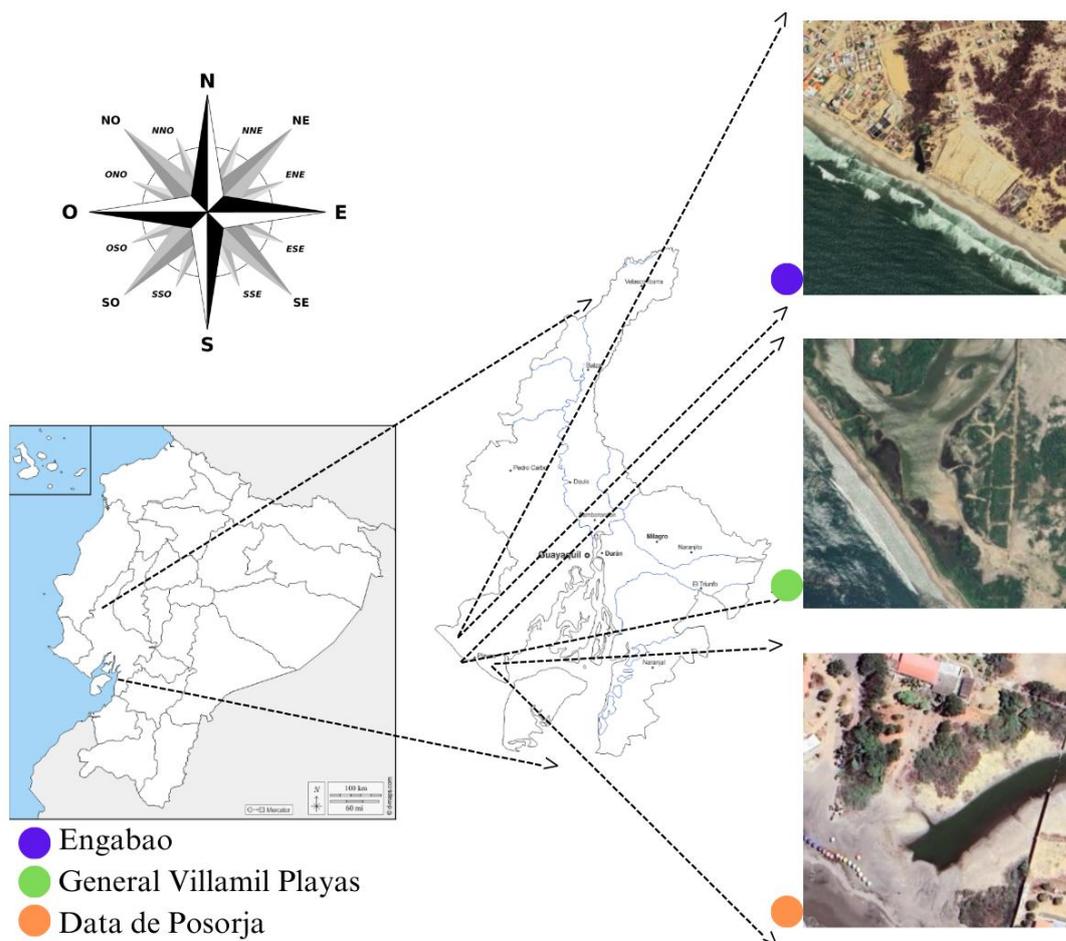


Figura 1. *Zona de muestreo*. Fuente: Autores, 2025.

**Aspecto sanitario:** Las plantas presentaron un aspecto saludable, follaje verde sin signos de clorosis y necrosis. Se verificó la ausencia de daños por patógenos o herbívoros y sin deformaciones morfológicas evidentes.

**Crecimiento:** Los brotes muestreados manifestaron un desarrollo alrededor de 15-20 centímetros de altura, cobertura foliar uniforme y evidenciaron un sistema radicular completo y desarrollado.

**Distribución geográfica:** La obtención de las muestras se ejecutó en zonas con características de salinidad y contaminación. A causa de se recolectan varias muestras de un

mismo lugar, estas deberán ser tomadas con una distancia considerable entre una y otra para garantizar la independencia estadísticas de las muestras.

**Sustrato:** Las condiciones del suelo se documentaron para ser tomadas en cuenta en caso de que sean distintas unas de las otras. Se extrajeron alrededor de 100 g de suelo de donde se obtiene cada una de las plantas esta muestra se colectará a una profundidad de 0 – 20 cm. Las muestras se depositaron en bolsas de polietileno rotuladas y se conservan las muestras en refrigeración a temperatura de 4°C hasta su análisis.

**Raíces:** Se seleccionaron sistemas radiculares que se encuentren con integridad estructural y desarrollo apropiado. Se procedió a extraer las raíces con ayuda de una pala, cuidando las estructuras de estas. Se segregaron submuestras destinadas para el análisis de colonización de micorrizas y la cuantificación de metales.

## Capítulo 2

### Marco teórico

#### 2.1 Contaminación por metales pesados

##### 2.1.1 Cadmio

El Cd un metal de transición raro de encontrar en el medio ambiente pese a que su ubicación suele ser en la corteza terrestre (rocas y suelo) forma parte de los metales pesados teniendo una densidad mayor a  $5 \text{ g/cm}^3$ , con un aspecto blanquecino y de característica dúctil, representa un compuesto toxico a bajos niveles de exposición, afectando de manera aguda la salud de todos los seres vivos («NTP Toxicity Studies Of Cadmium Oxide (CAS No. 1306-19-0) Administered By Inhalation To F344/N Rats And B6C3F1 Mice.», 2016).

Por lo general, no se encuentra en su estado puro, sino más bien relacionado a otros elementos, entre ellos el más frecuente el Zn, debido a sus similitudes químicas. El sulfuro de Cd, único mineral de este metal no forma parte de las fuentes comerciales, la mayor fuente es obtenido como subproducto del refinamiento del Zn (Lenntech, 2021).

Como resultado del aumento de actividades antropogénicas, la elaboración de fertilizantes, la refinería y el manejo inadecuado de efluentes cuya composición de Cd (o sus derivados) es alta, su presencia en el ecosistema ha tenido un aumento creciente, alcanzando una liberación estimada de 30 mil toneladas anuales al ambiente (Romero Bonilla et al., 2024).

Su nula degradación implica que, una vez que forma parte del ecosistema este va a estar en constante circulación, como resultado de su flexibilidad para formar compuestos solubles, lo que le permite hacerse paso en diversos compartimentos ambientales. Por ejemplo, aunque posee una alta solubilidad en los suelos, como consecuencia de presencia en compuestos como  $\text{CdCl}_2$  y  $\text{CdSO}_4$ , no se inmoviliza, puesto que presenta poca afinidad con partículas de suelos arcillosos, al facilitar su movilidad a través del agua del suelo. A su vez, la presencia de iones

$\text{Cd}^{2+}$  le permite ingresar a las raíces de diversas especies vegetales, debido a su similitud iónica con  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Zn}^{2+}$ , componentes esenciales en las plantas, lo que favorece su absorción sin mayor dificultad (Hernández-Baranda et al, 2019).

### **2.1.2. Plomo**

Con una masa atómica de 207,18 g/mol, una densidad de 11.34 g/cm<sup>3</sup> y un característico color azulado, el Pb es el metal pesado con mayor incidencia en la biosfera (López, 2025). De manera similar al Cd, es poco común encontrarlo en su estado elemental, ya que está presente en sales, óxidos o compuestos organometálicos. A pesar de que su disponibilidad en el ambiente es considerable, su mayor fuente de emisión proviene de actividades humanas. Entre 1950 y 2000, el uso de Pb en la gasolina generó un aumento significativo en sus niveles a nivel global, alcanzando un estimado de 94,6 millones de kg de residuos provenientes de los escapes de los vehículos.

Una de sus propiedades más relevantes es su capacidad para formar aleaciones con otros metales como Cu, Sb, As, Cd, Bi y Na que se utilizan en la fabricación de cañerías, pigmentos, municiones y materiales de construcción. Este metal ha sido utilizado desde 5000 a.C., por lo que su uso no es algo nuevo, pero sí algo que ha ido creciendo con el tiempo, dado a la cantidad de aplicaciones que se le han encontrado (CDC Updates Blood Lead Reference Value, 2024).

El Pb tiende a adherirse a las partículas del suelo, lo que explica por qué aún se detectan concentraciones elevadas en estudios recientes, en gran parte, debido a su uso masivo en combustibles hace décadas. Aunque algunos de sus compuestos pueden transformarse en otras formas químicas, como resultado de factores ambientales, en su estado puro no se degrada, lo que lo convierte en un contaminante persistente que sigue presente en el ecosistema incluso años después de haber sido liberado.

Las zonas cercanas a industrias, edificios antiguos y vertederos suelen estar más expuestas a la contaminación por Pb, incluso si no hay indicios visibles de contaminación. Esto se debe a su capacidad transportarse a través del aire, el agua y los alimentos, y también puede ser ingerido al tragar polvo o tierra contaminada. Algo bastante común es el consumo de Pb a través del agua potable a causa del desgaste de las cañerías hechas con aleaciones de este metal, que se degradan con el tiempo cuando el pH es ácido (IHME, 2021).

Aunque el Pb no es un elemento esencial para las plantas, se encuentra presente en muchas especies por la contaminación ambiental. Sin embargo, su alta afinidad con las partículas del suelo hace que la mayor parte de este metal se acumule en las raíces, adherido a las paredes celulares, lo que impide su translocación a otras partes de la planta (Solis-Mendoza et al., 2012).

### ***2.1.3 Situación actual en zonas costeras del Ecuador***

Ecuador, al ser un país con una gran diversidad geográfica, cuenta con una extensa zona costera que se extiende desde Esmeraldas hasta El Oro, ofreciendo un atractivo turístico significativo. Si bien esto representa un beneficio económico para las comunidades locales, el impacto ambiental asociado al turismo masivo ha generado una degradación progresiva de los ecosistemas costeros.

CSIL Centre for Industrial Studies (2008) remarca que uno de los principales problemas ambientales en estas zonas es el incremento de la contaminación en las playas, impulsado por la falta de medidas efectivas para gestionar los residuos generados por la actividad turística. Dentro de los contaminantes más comunes se encuentran residuos sólidos, como latas de aluminio, envolturas metálicas y baterías, los cuales pueden liberar metales pesados como Al, Cd, y Pb en el ambiente. Además, el uso de protectores solares con compuestos como ZnO y TiO<sub>2</sub> representa otro factor de riesgo para la biodiversidad marina.

Las actividades pesqueras también contribuyen a la contaminación por metales pesados, debido al uso de embarcaciones que pueden contener pinturas antiincrustantes, combustibles o piezas metálicas corroídas, facilitando la liberación de Cu, Pb y Zn al agua (Navarrete-Forero et al., 2019). A esto se suma el arrastre de contaminantes provenientes de zonas industriales y agrícolas, que llegan hasta las playas y funcionan como sistemas receptores de desechos contaminantes.

Un claro ejemplo de esta problemática se observó en un estudio realizado en 2013 en el Estero Salado, donde se reportaron concentraciones de 0,05 ppm de Cd y 0,027 ppm de Pb, valores que superan los límites permisibles de 0,005 ppm para cada metal. Estas concentraciones se relacionaron con la posible descarga directa o indirecta de residuos industriales en el estero (Vaca et al., 2024).

Si bien la información específica sobre la contaminación por metales pesados en playas ecuatorianas es limitada, existen estudios sobre especies marinas que han mostrado bioacumulación de estos elementos. Según Salvatierra-Alfago (2022), la especie *Dosidicus gigas*, proveniente de la zona costera de Manta, presentó concentraciones de Cd entre 0,03 mg/kg y 0,11 mg/kg, y de Pb entre 0,22 mg/kg y 0,44 mg/kg. Aunque estos valores pueden parecer bajos, su presencia en organismos marinos sugiere que los metales pesados no solo están presentes en el suelo o en cuerpos de agua dulce, sino que también pueden provenir del mar y acumularse en la fauna marina, lo que representa un riesgo potencial para el ecosistema y la cadena alimenticia.

## **2.2 Técnicas de análisis de metales pesados**

### **2.2.2 Espectroscopía de absorción atómica (EAA)**

El equipo de espectrofotometría de absorción atómica o por sus siglas en español EAA es un equipo utilizado para la cuantificación precisa de elementos metálicos provenientes de

diversas muestras. Su fundamento se basa en la absorción de luz por parte de átomos desionizados para dar paso a un estado gaseoso y así medir su concentración de manera exacta (Fairulnizal et al., 2019).

El EAA es una herramienta importante para la determinación de metales en diversas áreas, su uso en los análisis de control de calidad y estudios toxicológicos ha sido de gran ayuda, debido a su capacidad para detectar analitos incluso en concentraciones bajas (Matusiewicz, H. 2017). Siguiendo la ley de Beer-Lambert, este equipamiento especializado permite que los átomos que se encuentran en un estado libre, debido a la atomización obtenida como resultado de una llama originada a partir de una mezcla de aire y acetileno, o por horno de grafito absorban radiación electromagnética en longitudes de onda específicas emitidas por lámparas de cátodo hueco o lámparas de descarga sin electrodos para cada elemento, lo que nos permite identificar cual elemento está presente y en qué cantidad (Welz et al, 2008).

### **2.3 Fitorremediación**

La fitorremediación es una tecnología biotecnológica que utiliza plantas para descontaminar suelos, aguas y aire afectados por diversos contaminantes. Este proceso se basa en la capacidad de ciertas plantas para absorber, acumular, degradar o estabilizar contaminantes a través de mecanismos como la fitodegradación, fitoextracción y fitovolatilización. Según Mendarte-Alquisira, Alarcón y Ferrera-Cerrato (2021), la fitorremediación asistida por microorganismos puede mejorar la eficiencia de este proceso, en particular los suelos contaminados con compuestos orgánicos persistentes como el DDT.

Si bien la fitorremediación se presenta como una técnica atractiva para descontaminar suelos afectados por metales pesados, su implementación a gran escala enfrenta obstáculos significativos. Entre ellos destacan la gestión adecuada de la biomasa vegetal una vez finalizado el proceso, la carencia de regulaciones nacionales que definan los estándares de calidad del

suelo para diversos usos y, por último, la necesidad de profundizar en la investigación sobre especies vegetales con capacidad fitorremediadora y su adaptación a diferentes contextos contaminados (López Hernández & Morales Hernández, 2022).

En comparación con metodologías fisicoquímicas convencionales, este enfoque biológico exhibe ventajas significativas. Su versatilidad se evidencia en su capacidad para remediar contaminantes metálicos en múltiples matrices ambientales, incluyendo suelos, atmósfera y sistemas acuáticos (Yang, You, & Zheng, 2019). Los mecanismos principales de la fitorremediación incluyen la fitodegradación, la fitoextracción, la fitovolatilización y la fitoestabilización. La fitodegradación se basa en el uso de plantas para degradar o transformar contaminantes orgánicos en sustancias menos tóxicas a través de reacciones enzimáticas realizadas por las plantas y microorganismos en la rizosfera (Núñez López et al., 2004). La fitoextracción, una técnica que emplea plantas para absorber y acumular metales pesados en sus tejidos se presenta como una alternativa económica para descontaminar suelos. Sin embargo, su principal limitante es la duración del proceso, que depende de la tasa a la cual las plantas extraen los metales del suelo. Esta tasa, a su vez, se ve influenciada por diversos factores como la interacción raíz-metal, la capacidad de la planta para acumular metales y la disponibilidad de estos en el suelo. Como señala Alexander Neaman en 2022, estos factores hacen que la fitoextracción sea un proceso lento y en muchos casos inviable.

### ***2.3.1 Especies fitorremediadoras***

Las especies halófitas, plantas adaptadas a ambientes salinos, han demostrado un gran potencial en la fitorremediación de suelos salinos. Estas plantas son capaces de absorber y acumular sales en sus tejidos, lo que ayuda a reducir la salinidad del suelo y mejora su calidad para el cultivo de otras plantas. Un estudio realizado por Lastiri-Hernández et al. (2021) evaluó la efectividad de especies halófitas como *Sarcocornia fruticosa* y *Suaeda vera* en la reducción

de la salinidad del suelo, lo que las convierte en una herramienta eficaz para la fitodesalinización.

La capacidad para tolerar y reducir la salinidad, de estas plantas demuestran un gran potencial para la fitorremediación. Pueden absorber y acumular metales pesados en sus tejidos, lo que ayuda a limpiar suelos contaminados. Un estudio realizado por Shang et al. (2020) resaltan la promesa de la fitorremediación con halófitas para descontaminar suelos salinos. Si bien reconocen los desafíos asociados a esta técnica, enfatizan el papel de especies como *S. salsa* en la absorción y acumulación de metales pesados. Concluyen que, aunque se necesitan más estudios, las halófitas representan una alternativa prometedora para la remediación de estos entornos contaminados (ver anexo 1).

El notable potencial de las halófitas para crecer en entornos salinos y contaminados las posiciona como un recurso estratégico en la gestión ambiental sostenible. Sus características especiales las hacen idóneas para remediar suelos degradados y mitigar los efectos de la contaminación (Singh et al., 2022).

### ***2.3.2 Factores que afectan la eficiencia***

La eficacia de las halófitas en la fitorremediación de metales es un proceso multifactorial influenciado por una compleja interacción de variables, como las propiedades del suelo, la especie vegetal seleccionada, las comunidades microbianas asociadas y las condiciones ambientales prevalecientes (Singh et al., 2022).

Por otro lado, Coyago y Bonilla (2019) pone de manifiesto las limitaciones inherentes a la fitorremediación de suelos contaminados con Pb. Si bien la biomasa vegetal juega un papel crucial en la capacidad de absorción de los metales, factores como la cinética de absorción y los mecanismos de tolerancia limitan la eficiencia del proceso a largo plazo. La activación de

mecanismos de desintoxicación en las plantas, que reducen la absorción y translocación de los metales, representa un cuello de botella en la fitorremediación. Estos hallazgos sugieren que la fitorremediación debe complementarse con otras tecnologías para lograr una descontaminación efectiva.

## **2.4 *Batis maritima***

Las halófitas son plantas que toleran altas concentraciones de sal y son ricas en metabolitos con aplicaciones en diversas industrias. La *B. maritima* es una halófito común en zonas tropicales y subtropicales, adaptada a vivir en ambientes salinos, ha revelado un gran potencial biotecnológico (Scopel et al., 2021).

A pesar del evidente potencial de *B. maritima*, son escasos los estudios que exploran su interacción con los HMA. Se plantea que la simbiosis entre *B. maritima* y estos hongos, que establecen relaciones mutualistas con las raíces de las plantas facilitando la absorción de nutrientes, podría incrementar la eficacia de la fitorremediación bajo condiciones adversas, contribuyendo así a la restauración de los suelos impactados (Delgado Silva & Gutiérrez Montoya, 2022).

### **2.4.1 *Taxonomía y distribución***

*B. maritima* es una planta halófito (ver tabla 1) que se encuentra en las costas tropicales y subtropicales de América del Norte y del Sur, así como en las islas del Caribe. Su distribución incluye regiones costeras desde el sureste de Estados Unidos hasta Brasil, y también se ha registrado en las Islas Galápagos (POWO, 2023). Para más detalles sobre la distribución de *B. maritima* ver anexo 2.

Tabla 1. *Taxonomía de B. maritima.*

<b>Dominio</b>	Eukaryota
<b>Reino</b>	Plantae
<b>Filo</b>	Magnoliophyta
<b>Clase</b>	Magnoliopsida
<b>Orden</b>	Caryophyllales
<b>Familia</b>	Bataceae
<b>Género</b>	<i>Batis</i>
<b>Especie</b>	<i>Batis maritima</i>
Fuente: (Base de Datos de las Especies de Galápagos, 2024)	

#### 2.4.2 Características morfológicas

La *B. maritima* es un arbusto que se adapta a vivir en ambientes salinos, alcanzando alturas de entre 0,5 y 1 m de largo. Sus tallos, carnosos y flexibles, pueden crecer de forma horizontal o erguida, formando matorrales densos. Las hojas de esta planta son simples y carnosas, alcanza de 1 a 4,5 cm de largo y 1,6 a 2 mm de ancho, lo que les permite almacenar agua y adaptarse a las condiciones áridas. Su forma varía desde lineal hasta claviforme, y su color puede ser verde brillante o adquirir tonos rojizos. Las flores de la *B. maritima* son unisexuales y se agrupan en espigas densas. Las flores masculinas, con un perianto diferenciado, y las femeninas, más simples, se encuentran en la misma planta. Los frutos, de aspecto carnoso, se desarrollan a partir de la unión de varias flores femeninas (ver figura 2). Para finalizar, sus raíces, fibrosas y extendidas, le permiten anclarse en los suelos salinos y arenosos donde habita (Diego-Pérez et al., 2005).

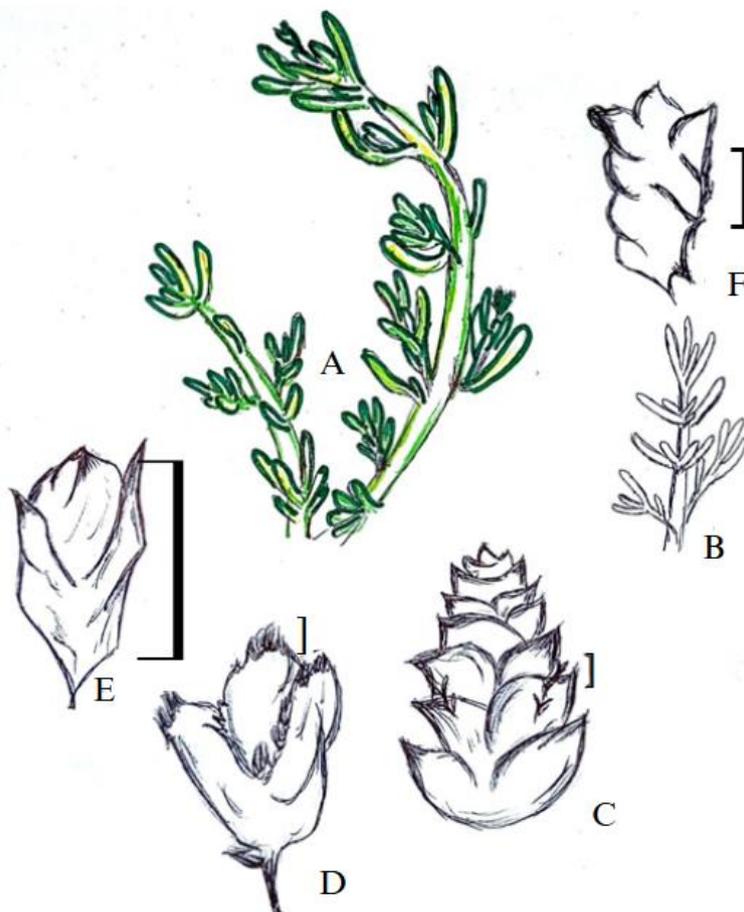


Figura 2. *B. maritima*. A) ramas y frutos. B) rama con inflorescencia masculina. C) inflorescencia masculina. D) inflorescencia femenina. E) fruto inmaduro. f) fruto compuesto. Fuente: Autores, 2025.

### **2.4.3 Potencial biorremediador**

En el contexto de la búsqueda de soluciones sostenibles para la remediación de suelos contaminados, Scopel et al. (2021) exploraron el potencial de *B. maritima* demostraron el potencial biotecnológico de esta especie. A través de un enfoque bioprospectivo, los autores evaluaron diversas propiedades de esta halófito, destacando su capacidad para crecer en suelos salinos y su riqueza en compuestos bioactivos. Estos resultados respaldan la idea de utilizar *B.*

*maritima* en sistemas de producción sostenible, combinando la remediación de suelos con la obtención de productos de alto valor agregado.

#### **2.4.4 Hiperacumulación**

Ciertas plantas poseen la capacidad de acumular contaminantes como los metales pesados en sus tejidos en concentraciones elevadas, superando con creces los niveles considerados normales, sin manifestar signos de toxicidad. Las plantas hiperacumuladoras han desarrollado estrategias fisiológicas y bioquímicas internas que les permiten tolerar estos niveles de metales, que serían letales para otras especies (Llugany et al., 2007).

#### **2.5 Hongos micorrízicos arbusculares (HMA)**

Los HMA son microorganismos simbióticos que entran en contacto con las raíces de las plantas y desarrollan una estructura especializada denominada arbusculos. Esta simbiosis facilita la absorción de agua y nutrientes por parte de las plantas en suelos delgados o contaminados (ver anexo 3). En el contexto de la fitorremediación, los HMA contribuyen a aumentar la tolerancia de las plantas a los metales pesados mediante mecanismos fisiológicos que inmovilizan los contaminantes en las estructuras fúngicas y estimulan a las plantas huésped (Ortiz et al., 2019).

##### **2.5.1 Simbiosis planta-HMA**

La interacción entre plantas y HMA establece una simbiosis beneficiosa que promueve la salud del suelo y mejora el crecimiento vegetal. Las plantas proporcionan a los hongos compuestos carbonados esenciales para su crecimiento y desarrollo, mientras que los hongos facilitan la absorción de nutrientes del suelo, como el P que son fundamentales para la planta. Esta asociación reduce la dependencia de fertilizantes químicos, promoviendo una agricultura más sostenible (Sarmiento & Rodríguez, 2021).

Estos microorganismos confieren a las plantas una mayor tolerancia a condiciones adversas, como la salinidad, la sequía, y favorecen la absorción de nutrientes esenciales. Asimismo, los HMA contribuyen a la remediación de suelos contaminados y a la mitigación del cambio climático, lo que los convierte en aliados clave para una agricultura más sostenible (Silva & Montoya, 2022).

### ***2.5.2 Rol en la tolerancia a metales pesados***

Los metales pesados son una seria amenaza para la salud de las plantas y los ecosistemas. Sin embargo, la asociación simbiótica entre las plantas y los HMA puede mitigar los efectos adversos de estos contaminantes. Los HMA ayudan a las plantas a tolerar niveles elevados de metales pesados al reducir su absorción y translocación, actuando como una especie de escudo protector (Riopedre-Galán et al., 2021).

Pongo por caso Moncada et al. (2019), observaron que, aunque el cacao puede tolerar cierta cantidad de Cd, la asociación con HMA podría limitar la acumulación de este metal en las partes comestibles de la planta. Los resultados sugieren que la selección de especies de HMA adecuadas podría ser una estrategia efectiva para reducir la exposición a metales pesados en cultivos alimentarios

## Capítulo 3

### Materiales y métodos

#### 3.1 Área de estudio

El presente estudio se centra en tres áreas seleccionadas que comprenden zonas estratégicas ubicadas en la costa ecuatoriana, cada una con sus características edáficas y ambientales, esta diversidad de sitios permite una evaluación p de la calidad del suelo y el microbioma. Estas localizaciones proporcionando una visión más amplia de las condiciones predominantes en esta región.

##### 3.1.1 Estuarios

Los estuarios son cuerpos de agua de origen fluvio-marino cerrados, ubicados en desembocaduras de drenajes provenientes del mar por lo tanto tienen presencia de salinidad. En Ecuador, los estuarios son fundamentales para la biodiversidad y la economía local. Los principales estuarios del país incluyen el estuario del río Guayas, el estuario del río Esmeraldas y el estuario del río Chone. Estos estuarios albergan una gran variedad de especies de flora y fauna, entre ellos manglares, peces, crustáceos y aves migratorias (Castro & Chang, 2015). Los manglares, en particular, desempeñan un papel crucial en la protección de las costas contra la erosión y en la filtración de contaminantes del agua (Castro & Chang, 2015).

Es importante destacar que todas las muestras y plantas utilizadas en este estudio fueron recolectadas en estuarios de formación reciente. Estos ecosistemas se originaron a partir del último ascenso del nivel del mar, inundando las desembocaduras de los ríos. Esta característica geológica particular confiere a estos estuarios propiedades únicas que influyen en las comunidades vegetales y los procesos ecológicos que estudiamos.

### ***3.1.2 Características edafoclimáticas***

El Ecuador se divide en tres regiones principales: Litoral o Costa, Sierra y Oriente, además de la Región Insular que incluye las Islas Galápagos. La región Costa se caracteriza por un clima tropical que varía de árido en el suroeste a muy húmedo en el norte, en la zona del Chocó. La estación húmeda, con altas temperaturas y lluvias abundantes, se extiende de diciembre a abril-mayo, influenciada por la corriente cálida de El Niño y la Zona de Convergencia Intertropical. La estación seca, con temperaturas más bajas y escasas lluvias, dura de junio a noviembre o diciembre (Varela & Ron, 2018). De acuerdo con datos del CLIRSEN y MAGAP (2012), las zonas costeras ecuatorianas, como General Villamil Playas, presentan una temperatura media anual de 25 °C. La variabilidad térmica en estas áreas es reducida, con una amplitud térmica anual de aproximadamente 2 °C. Esta información es fundamental para comprender las condiciones climáticas y su influencia en los ecosistemas costeros (ver anexo 4).

Este gradiente de precipitación crea una diversidad de hábitats, desde zonas desérticas hasta bosques húmedos tropicales. Por otro lado, hay un gradiente de lluvia de occidente a oriente, donde la presencia de los Andes provoca que el aire húmedo proveniente del océano libere su humedad, produciendo lluvias. Estas características edafoclimáticas influyen en la biodiversidad y en los usos del suelo en la región costera, permitiendo el desarrollo de actividades agrícolas en áreas fértiles y limitando el crecimiento de vegetación en zonas de alta salinidad, como los salitrales (Varela & Ron, 2018).

## 3.2 Material biológico

### 3.2.1 Colecta de *B. maritima*

Para realizar un análisis de la concentración de metales pesados en hojas y raíces de *B. maritima*, se llevó a cabo la recolección de muestras en tres zonas costeras perturbadas. Si bien el diseño experimental inicial contemplaba la recolección de brotes de *B. maritima* de 10 cm, las condiciones de aclimatación no permitieron obtener plantas de este tamaño. En consecuencia, se procedió a coleccionar 24 individuos con una altura promedio de  $17,38 \pm 1,24$  cm, utilizando una pala para extraerlos y preservar el material rizosférico. La zona de muestreo se ubicó en Playa El Pelado, General Villamil, reconocida por su alta diversidad botánica y la abundancia de *B. marítima* (ver figura 3).

Esta elección se justifica por la necesidad de contar con un número suficiente de individuos sanos y por la conveniencia de trabajar en un sitio con características ecológicas bien conocidas.



Figura 3. *Recolección de B. maritima*. Los autores (2025).

### ***3.2.2 Obtención de inóculos de HMA***

Para la obtención de inóculos micorrízicos, se utilizó suelo natural en el diseño experimental, lo que eliminó la necesidad de realizar inóculos adicionales. No obstante, se llevó a cabo una primera evaluación del suelo rizosférico, la cual reveló una densidad de 40 esporas en 10 g de suelo. Estudios recientes han demostrado que la densidad de esporas de HMA puede variar dependiendo del tipo de suelo y las condiciones ambientales. Prueba de ello en un estudio realizado en zonas del trópico húmedo del Ecuador, se encontró una densidad media de esporas que oscilaba entre 100 y 360 esporas por 100 de suelo (Moína-Quimí et al., 2018).

### ***3.2.3 Preparación de solución nutritiva***

La selección del fertilizante VITAFOL 10-40-10 se fundamentó en su composición nutricional balanceada (N:10%, P:40%, K:10%, S:1%, B:0.20%, Cu:0.20%), beneficiosa para el desarrollo de plantas halófitas en condiciones de estrés. Estudios previos han demostrado que el N y K optimizan los mecanismos de osmorregulación en ambientes salinos (Hasanuzzaman et al., 2019). La capacidad de las halófitas para absorber calcio, potasio y sodio en un entorno salino es un indicador clave de cómo la planta está respondiendo al estrés. La absorción de estos iones es esencial para mantener el equilibrio osmótico y la homeostasis celular, procesos vitales para la supervivencia de la planta en condiciones salinas este hallazgo concuerda con lo reportado por Bekmirzaev et al. (2021).

Esta formulación granulada hidrosoluble se preparó utilizando 44 gramos del producto en 11 litros de agua salina (proporción calculada a partir de la dosis comercial de 800 g/ 200 L).

### 3.3 Diseño experimental

En el presente estudio se evaluó, mediante la aplicación de un diseño unifactorial aleatorizado el rendimiento de la expuesta a tres concentraciones distintas de metales pesados, como son el Cd y Pb. El experimento incorporó cuatro tratamientos, correspondientes a tres inóculos de HMA provenientes de distintas zonas costeras más un control, cada uno con tres réplicas. Se monitorearon distintos parámetros morfométricos que incluyen la altura, número de hojas, la bioacumulación de Cd y Pb en tejidos vegetales. La comparación entre medias se efectuó mediante la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

El diseño unifactorial para el experimento es el siguiente:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij}$$

- $Y_{ij}$ : Variable respuesta observada en la j-ésima repetición del i-ésimo tratamiento
- $\mu$ : Media general del experimento
- $\tau_i$ : Efecto del i-ésimo tratamiento (fuente de inóculo HMA)
- $\epsilon_{ij}$ : Error experimental
- $i$ : 1,2,3 (tratamientos)
- $j$ : 1,2,3 (repeticiones)

#### 3.3.1 Tratamientos

Las plantas de *B. maritima* se trasplantaron conservando su sustrato natural de origen, manteniendo así las condiciones edáficas propias del ecosistema costero. Las plantas se establecieron en fundas plásticas con capacidad de 3 libras, asegurando espacio adecuado para el desarrollo radicular (ver tabla 2).

Tabla 2. *Distribución de tratamientos experimentales para la fitorremediación con B. marítima*

<b>Número</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>Descripción</b>
<b>T0</b>	Control	<i>B. marítima</i> + HMA + sin metales pesados
<b>T1</b>	Concentración baja	<i>B. marítima</i> + HMA + (100 ppm Cd/Pb)
<b>T2</b>	Concentración media	<i>B. marítima</i> + HMA + (250 ppm Cd/Pb)
<b>T3</b>	Concentración alta	<i>B. marítima</i> + HMA + (500 ppm Cd/Pb)

Se implementó un período de aclimatación de una semana, durante el cual las plantas recibieron riego controlado con solución nutritiva VITAFOL 10-40-10 (ECUAFOL) administrando 20 mL diarios por unidad experimental durante tres semanas consecutivas. La exposición a metales pesados se realizó durante las dos semanas finales del experimento, mediante la aplicación diaria de 20 mL de solución con concentraciones graduales de Cd y Pb (100, 250 y 500 ppm) según el tratamiento correspondiente (ver anexo 6 y 7)

### 3.3.2 Variables de estudio

#### **Variables independientes:**

Concentraciones de metales pesados: Se utilizaron tres concentraciones de Cd y Pb: 100 ppm, 250 ppm y 500 ppm respectivamente, aplicadas y en combinación.

#### **Variables dependientes:**

Parámetros morfométricos: Se midió la altura de las plantas (en cm) desde la base del tallo hasta la hoja más alta, utilizando una regla graduada (ver anexo 14)

Clorofila: La medición de clorofila se da en los 4 tratamientos al final del experimento, ver tabla 12 y 13.

### **3.4 Procedimientos analíticos**

#### **3.4.1 Caracterización de esporas de micorrizas presente en sistema radicular**

Para cuantificar la abundancia de esporas en las muestras de suelo, se implementó un protocolo riguroso que incluye la recolección de muestras, tamizado en serie y centrifugación diferencial. Inicialmente, se obtuvieron muestras de suelo rizosférico a una profundidad de 20 cm en cada sitio de muestreo, se pesaron 10 g de suelo por muestra y se sometieron a un proceso de tamizado húmedo para separar las partículas de mayor tamaño, el material se resuspendió en 100 ml de agua, tras lo cual se implementó un sistema de tamizaje secuencial de 250, 125 y 75  $\mu\text{m}$  respectivamente.

La fracción de suelo retenida en el tamiz y se efectuó la purificación mediante doble centrifugación, la primera se realizó en tubos Falcon de 15 ml a una velocidad de centrifugación de 3000 rpm durante 5 minutos, se recolectaron el sobrenadante y añadirle Tween 80 más sacarosa y llevarla a centrifuga durante 5 minutos a 3000 rpm. El sobrenadante resultante se recuperó para su subsecuente análisis microscópico (Sieverding, 1983).

#### **3.4.2 Tinción de raíces**

La visualización de estructuras fúngicas intrarradicales se utilizó el protocolo de Ho-Plágaro et al. (2020). En primera instancia, las raíces se realizó un lavado exhaustivo con agua destilada para eliminar restos de suelo y otros materiales orgánicos. Seguido de la segmentación de material en fragmentos de 2 cm de longitud (ver anexo 12). Estos segmentos serán colocados en casetes histológicos y se procederá a la clarificación con KOH 10% durante tres semanas. La etapa de acidificación se desarrolló lavando las raíces con agua destilada y mediante tratamiento con tratadas con HCl 2 % durante 20 minutos para eliminar los tejidos no lignificados culminando con la tinción azul de tripano al 0.05 % en ácido láctico durante 15

minutos para facilitar la penetración del colorante. En este estudio, se realizaron algunas modificaciones al protocolo original (ver anexo 13).

El montaje de las raíces teñidas en portaobjetos se observó bajo el microscopio 10 y 40 x lo cual permitió identificar y evaluar las estructuras fúngicas características: hifas, vesículas y arbusculos, además del porcentaje de colonización micorrízica.

### ***3.4.3 Determinación de metales pesados***

#### **Tipo y número de muestras para análisis inicial de Cd y Pb.**

Fueron recolectadas tres muestras de: suelo, tejido radicular y tejido foliar de cada uno de los sitios correspondientes a nuestro estudio (General Villamil, Engabao y Data de Posorja), entre las 4 submuestras recolectadas de cada tipo, se realizó una mezcla homogénea para cada muestra y se separaron en muestras la obtención de tres replicas, teniendo un total de 27 muestras, esto con el fin de obtener una mayor solidez estadística y menor variabilidad en los resultados (ver anexo 8 y 9).

#### **Preparación y digestión de las muestras iniciales**

Las muestras fueron colocadas en placas Petri con el fin de ser secadas en una estufa a una temperatura de  $100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 12 a 24 horas, posterior al secado fueron colocadas en mortero para ser pulverizadas y obtener una muestra homogénea que fue almacenada en fundas herméticas, las muestras fueron etiquetadas según el nombre del sitio de recolección y el tipo de muestra (Angélica et al., 2007).

Las muestras radiculares y foliares fueron pesadas en tubos de digestión (Capacidad de 55ml, PET), con ayuda de una balanza analítica, con una precisión de  $0,5000 \pm 0,5099\text{ g}$  a los cuales se les adiciono de 10 ml de ácido nítrico 65 % para dar paso a la digestión en el microondas, el cual consiste en una rampa de temperatura, en la cual la temperatura se eleva hasta alcanzar los  $200^{\circ}\text{C} \pm 10\%$  por 20 minutos (Burea, 2023). Por otro lado, las muestras de

suelo tuvieron su digestión en plancha calentadora a una temperatura de 200 °C durante 45 minutos, con un pesaje aproximado de  $0,2500 \pm 0,2599$  en matraz Erlenmeyer, a lo cual se le adiciono 10ml de ácido nítrico 65 % durante 10 minutos, adicional se le añadió 10 ml de ácido clorhídrico 37 % y se dejó calentar hasta completar los 45 minutos (ver anexo 15).

Una vez que todas las muestras completaron su digestión, fueron colocadas dentro de la cabina de extracción con el fin de evitar la exposición a vapores tóxicos emitidos por los reactivos utilizados, tanto los tubos de digestión como los matraces Erlenmeyer se dejaron reposar alrededor de 10 minutos, debido a la temperatura a la que fueron expuestos para evitar cualquier tipo de incidente relacionado a quemaduras (tanto físicas como químicas), una vez que las muestras estuvieron a una temperatura adecuada, se procedió a filtrar el contenido en matraces aforados de 25 ml con ayuda de embudos pequeños y papel filtro (Figura 4).



Figura 4. MS, MR, MF posterior al proceso de digestión. Fuente: Autores, 2025.

### **Elaboración de curvas de calibración**

Para el análisis de tejidos vegetales, se elaboraron los estándares de Cd y Pb para las curvas de calibración. En el caso del Cd, se preparó una solución estándar de 100 ppb. Para ello, se tomó una alícuota de 1000  $\mu\text{L}$  de una solución de Cd 1000 ppm y se transfirió a un matraz aforado de 100 ml, obteniendo una concentración de 10 ppm. A partir de esta, se extrajo una alícuota de 1000  $\mu\text{L}$ , que fue colocada en otro matraz de 100 ml y llevada a aforo para alcanzar la concentración final de 100 ppb.

Una vez preparados los estándares, se procedió a la curva de calibración, la cual incluyó la preparación de spikes con concentraciones de 0,5, 1, 2, 3 y 4  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . Para ello, se tomaron alícuotas de 125, 250, 500, 750 y 1000  $\mu\text{L}$ , junto con la muestra de tejido vegetal utilizada como matriz, y se añadieron a los tubos de digestión correspondientes (ver tabla 3). A continuación, la curva fue sometida a digestión por microondas y las soluciones resultantes fueron transferidas a matraces aforados de 25 ml.

En el caso del análisis de Cd en suelo, se utilizaron estándares con concentraciones distintas. Se tomó una alícuota de 1000  $\mu\text{L}$  de la solución de Cd 10 ppm preparada de manera previa y se transfirió a un matraz aforado de 50 ml. A partir de este estándar, se prepararon spikes con concentraciones de 0.5, 1, 2, 3 y 4  $\mu\text{g}/\text{L}$ , para lo cual se extrajeron alícuotas de 125, 250, 500, 750 y 1000  $\mu\text{L}$  y se añadieron a los matraces aforados de 50 ml (ver tabla 3).

Tabla 3. *Volúmenes requeridos para la elaboración de curva de tejidos y suelos para Cd.*

<b>Curva muestras de tejido vegetal</b>				
<b>Estándar</b>	<b>Puntos de la curva</b>	<b>Volumen (<math>\mu\text{L}</math>)</b>	<b>Spikes</b>	<b>Dilución final (ml)</b>
<b>Cd 100 ppb</b>	C1	125	0,5	25
	C2	250	1	25
	C3	500	2	25
	C4	750	3	25
	C5	1000	4	25
	Qc	250	1	25
<b>Curva muestras de suelo</b>				
<b>Cd 200 <math>\mu\text{g}/\text{L}</math></b>	C1	125	0,5	50
	C2	250	1	50
	C3	500	2	50
	C4	750	3	50
	C5	1000	4	50
	Qc	125	0,5	50

De manera similar, se realizó la curva de calibración de Pb para tejidos vegetales. Para ello, se preparó una concentración estándar final de 1 ppm a partir de una solución madre de 1000 ppm. Se tomó una alícuota de 100  $\mu\text{L}$ , que fue transferida a un matraz aforado de 100 ml y llevada a aforo para obtener la concentración deseada.

A partir de esta solución, se prepararon spikes con concentraciones de 2, 5, 10, 20 y 40 g/kg. Para ello, se tomaron alícuotas de 50, 125, 250, 500 y 1000  $\mu\text{L}$  con pipeta automática y se colocaron en tubos de digestión junto a la muestra base de tejido vegetal correspondiente. Las soluciones fueron transferidas a matraces aforados de 25 ml (ver tabla 4).

Para la curva de calibración en suelo, se preparó una solución estándar final de 5 ppm. A partir de esta, se generaron spikes con concentraciones de 5, 10, 20, 40 y 50  $\mu\text{g/L}$ , mediante la extracción de alícuotas de 50, 100, 200, 400 y 500  $\mu\text{L}$  del estándar de Pb (ver tabla 4). Estas fueron añadidas a los mismos matraces aforados utilizados para los spikes de Cd en la curva de muestras de suelo.

Tabla 4. *Volúmenes requeridos para la elaboración de curva de tejidos y suelos para Pb.*

<b>Curva muestras de tejido vegetal</b>				
<b>Estándar</b>	<b>Puntos de la curva</b>	<b>Volumen (<math>\mu\text{L}</math>)</b>	<b>Spikes</b>	<b>Dilución final (ml)</b>
<b>Pb 1 ppm</b>	C1	50	2	25
	C2	125	5	25
	C3	250	10	25
	C4	500	20	25
	C5	1000	40	25
	Qc	250	10	25
<b>Curva muestras de suelo</b>				
<b>Pb 5 ppm</b>	C1	50	5	50
	C2	100	10	50
	C3	200	20	50
	C4	400	40	50
	C5	500	50	50
	Qc	50	5	50

### **Análisis mediante Espectrofotómetro de Absorción Atómica con horno de grafito**

Las curvas de calibración y muestras a analizar fueron colocadas en viales descartables para a continuación ser analizados en el EAA por horno de grafito, al momento de leer Cd no es necesario la utilización de modificadores, sin embargo para la lectura de Pb si es necesario la adición de modificadores en viales como lo son 700 ul de fosfato de amonio monobásico 5 % + 300 uL nitrato de magnesio, esto para evitar la formación de otros compuestos que interfieran en la lectura del analito requerido (*Guía Breve de los Métodos Analíticos Para Determinar las Concentraciones de Plomo En la Sangre*, 2020). Adicional a esto, las condiciones del equipo se debieron de ajustar de la manera que corresponde para cada metal (ver tabla 5).

Tabla 5. *Condiciones instrumentales aplicadas en EAA por horno grafito.*

	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>
<b>Longitud de onda</b>	283.31	228.8
<b>Lectura</b>	Área del pico	Área del pico
<b>Ecuación</b>	Linear calcular el intercepto	Linear calcular el intercepto
<b>Volumen muestra</b>	20ul	20ul
<b>Volumen modificador</b>	5ul	N/A

Fuente: Bureau Veritas, 2023.

#### **3.4.4 Determinación de factores de bioconcentración, translocación y porcentaje de retención.**

Las plantas requieren una fuente de energía para su crecimiento, la misma se almacena para nutrir a la planta en desarrollo, una vez que brotan las hojas, las plantas pueden generar su propio alimento a través de la fotosíntesis. Los productos de la fotosíntesis, la sacarosa, constituyen un componente principal del asimilado, la sustancia transportada por el floema. El movimiento del asimilado a través de la planta se denomina translocación (FT) o transporte de

asimilado (Ha et al., 2022). La bioacumulación (FBC) es un proceso crucial se describe la acumulación neta de sustancias químicas o contaminantes en organismos vivos a lo largo del tiempo y su capacidad para ser eliminado o metabolizarlo (Alexander, 2006). Por otro lado, el porcentaje de retención se refiere a la concentración retenida de nuestro analito en las raíces.

$$\text{FBC} = \frac{\text{elemento total de planta}}{\text{elemento en el suelo}}$$

$$\text{FT} = \frac{\text{elemento en parte aérea}}{\text{elemento en parte radicular}}$$

$$\% \text{ Retención} = \frac{\text{elemento en parte radicular}}{\text{elemento total en la planta}} \cdot 100$$

## Capítulo 4

### Resultados y discusión

#### 4.1. Caracterización inicial HMA

##### 4.1.1 Diversidad de HMA nativos en plantas halófitas

Los resultados del análisis del suelo rizosférico revelaron una densidad de 40 esporas por 10 gramos de suelo, un valor que sugiere una población de HMA saludable. Además, se observó 3 morfotipos de HMA nativos en este sustrato. El análisis de las esporas recuperadas del suelo rizosférico permitió identificar dos géneros predominantes de HMA: *Glomus* y *Acaulospora*, se observa en la figura 5. La elección de este suelo específico se fundamentó en su menor nivel de contaminación y en la mayor diversidad botánica presente en la zona.

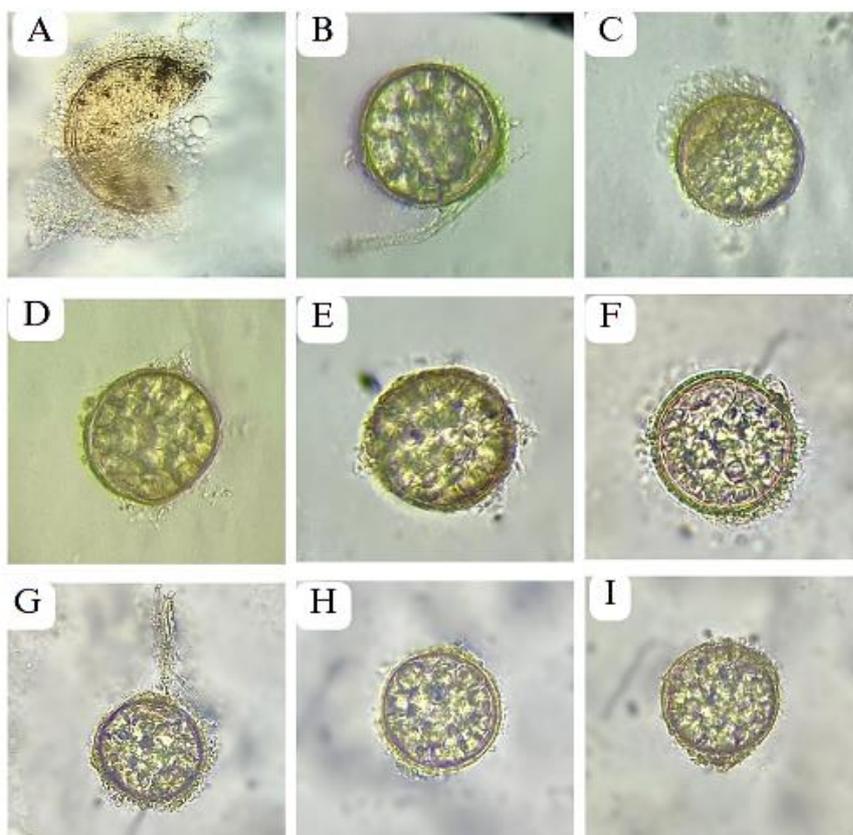


Figura 5. Esporas de HMA nativos de plantas *B. maritima*; B-I) *Glomus*, A) *Acaulospora*. A-C General Villamil Playas, D-F Engabao, G-I Data de Posorja. Fuente: Los autores (2025).

La caracterización morfológica sirve evaluar la diversidad de HMA en diferentes ecosistemas y comprender su papel en la dinámica de los suelos (Aguilar-Paredes et al., 2024).

En el caso de Bencherif et al. (2023), quien encontró resultados similares con un inóculo compuesto de cepas nativas de HMA adaptadas a suelos salinos. El análisis de identificación morfológica de las esporas reveló que predominio de *Dominikia sp.* y *Glomus deserticola*, en el sustrato analizado la densidad de las esporas fue 195 esporas por 10 g de suelo, la riqueza de estos resultados promete nuevas perspectivas respecto a la biorremediación de suelos. En otro estudio realizado en marismas ecosistema relacionados con estuarios y sitios cercanos al mar, se evaluó la utilización de la espora *Funneliformis geosporum* pertenece a la familia Glomeraceae. Las plantas inoculadas con esta espora lograron sobrevivir a las condiciones similares de las marismas por eso el promedio de longitud de brote aumentó, demostrando que las plantas inoculas con HMA toleran el estrés salino en comparación con plantas sin HMA (D'Entremont et al., 2021).

En el caso de Bencherif et al. (2023), se realizó un inóculo compuesto de cepas nativas de HMA adaptadas a suelos salinos. El análisis de identificación morfológica de las esporas reveló el predominio de *Dominikia sp.* y *Glomus deserticola*, en el sustrato analizado la densidad de las esporas fue 195 esporas por 10 g de suelo, la riqueza de estos resultados promete nuevas perspectivas respecto a la biorremediación de suelos. Marquez et al. (2024) menciona en su estudio el predominio de los géneros *Glomus* y *Acaulospora* en entornos desafiantes, por otra parte, menciona que se necesitan más estudios para comprender su papel en el crecimiento de las plantas en condiciones de estrés salino.

En otro estudio realizado en marismas ecosistema relacionados con estuarios y sitios cercanos al mar, se evaluó la utilización de la espora *Funneliformis geosporum* pertenece a la familia Glomeraceae. Las plantas inoculadas con esta espora lograron sobrevivir a las

condiciones similares de las marismas por eso el promedio de longitud de brote aumentó, demostrando que las plantas inoculas con HMA toleran el estrés salino en comparación con plantas sin HMA (D'Entremont et al., 2021; Yang et al., 2020).

#### 4.1.2 Estructuras micorrízicas iniciales

En la visualización de estructuras internas presentes en la raíz de los tres sitios iniciales, hubo una diferencia significativa según el test ANOVA ( $p < 0,05$ ), adicional a esto con ayuda de HSD Tuskey nos proporcionó la separación en subconjuntos homogéneos de los sitios con mayor presencia de hifas, vesículas y arbuscúlos en General Villamil con un porcentaje de micorrización del 60,26 % del total de estructuras micorrízicas en los tres sitios evaluados (ver tabla 8 y figura 6).

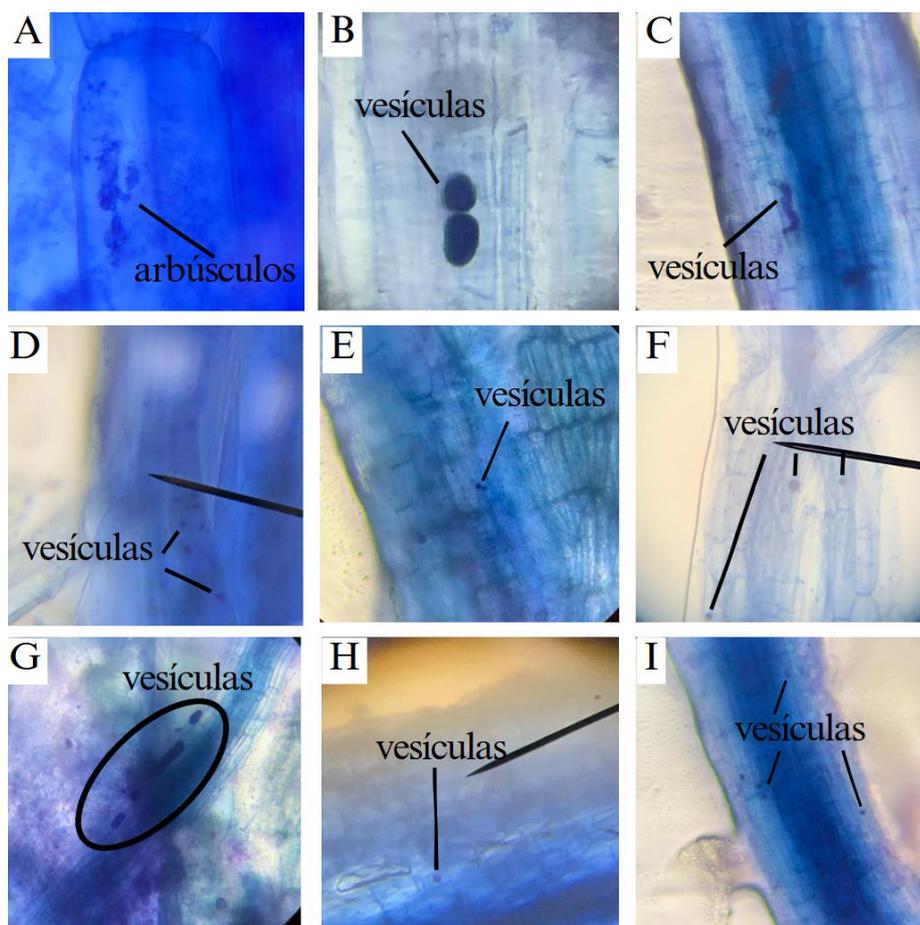


Figura 6. *Raíces teñidas de General Villamil, Engabao y Data de Posorja*. Nota: A-C: muestras radiculares de General Villamil (Playa El Pelado); D-F: muestras radiculares de Engabao (Playa El Paraíso); G-I: muestras radiculares de Data de Posorja (Varadero).

La diversidad botánica presente en esta zona puede influenciar de manera directa en la aparición de variedad de especies o cantidad de HMA, como lo menciona Chávez-Hernández et al. (2021), en un estudio orientado a la diversidad de HMA en plantas medicinales en el bosque templado “Agua escondida”, donde la presencia de diversas estructuras micorrízicas se hace evidentes en suelo que posean una mayor disponibilidad de raíces (ver anexo 11).

## **4.2 Determinación inicial de metales**

### ***4.1.1 Cuantificación de Cd y Pb para muestras iniciales***

Las muestras iniciales arrojaron resultados similares entre sí, permitiendo así obtener un panorama significativo de la concentración inicial de ambos metales en suelo, raíces y hojas. A partir de las tres réplicas tomadas en cada sitio, se observó que la muestra de hojas con mayor concentración de Pb correspondió a Data de Posorja (0,45 ppm de Pb), la de raíces con mayor contaminación se registró en Engabao (1,84 ppm de Pb) y la de suelo con el nivel más elevado provino de Engabao (4,55 ppm de Pb) como se observa en la figura 7. La cercanía de Data de Posorja a la playa Varadero que es concurrida por una alta cantidad de turistas de manera frecuente puede incidir en su alta concentración de metales pesados.

El valor p obtenido por ANOVA para el efecto del Pb en las tres zonas costeras es  $p = < 0,05$  indicando que hay diferencias estadísticamente significativas entre cada uno de los sitios, adicional los resultados obtenidos a partir de la prueba Tukey nos indica que todas las comparaciones tienen diferencia. De igual manera, si se hayo diferencia de medias significativas entre cada tipo de muestra, siendo un valor de  $p < 0,05$  entre cada una de las comparaciones (ver tabla 14 y 15).

A escala global, el Pb se considera el metal pesado con mayor presencia en suelos, cuerpos de agua e incluso en especies marinas (Huilcarema, 2019). Este fenómeno se debe, sobre todo, al uso histórico que se le ha dado en la fabricación de pinturas, combustibles y cañerías, lo cual propició su dispersión. Según Alloway (2012) el Pb es un metal mucho menos propenso a la lixiviación lo cual tiende a inmovilizarse en suelos con alta proporción de arcillas como los analizados en este estudio, tendiendo a acumularse con el pasar de los años.

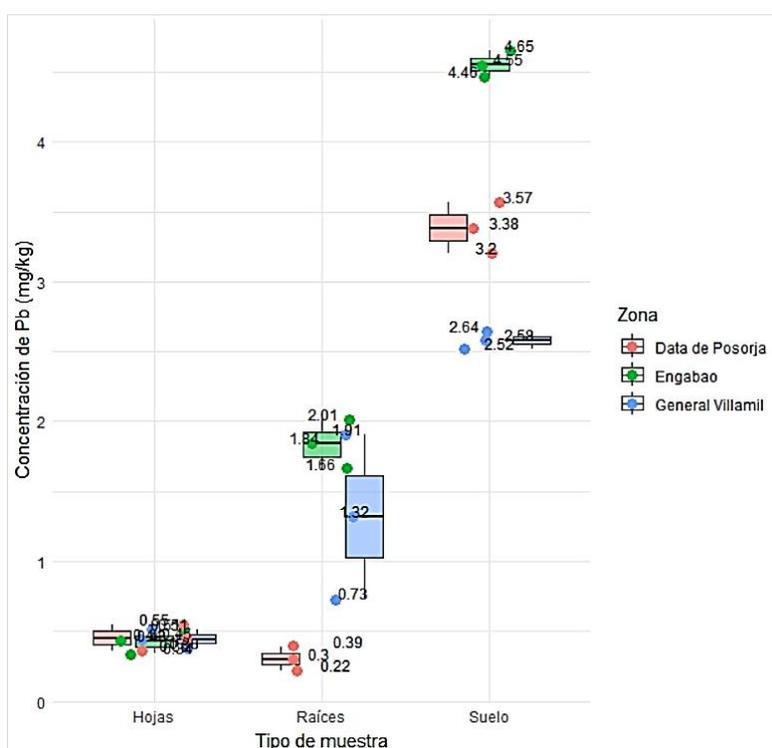


Figura 7. Distribución de concentraciones de Pb por tipo de muestra y zona. Fuente: Autores, 2025.

Por otro lado, al organizar de mayor a menor las concentraciones de Cd, se observó que en Data de Posorja el suelo registró el valor más alto (0,21 ppm), mientras que las raíces y las hojas presentaron 0,11 ppm y 0,10 ppm, respectivamente.

Los valores p muestran una diferencia significativa entre Data de Posorja y Engabao con un valor  $p = 0,007$ , siendo que Data de Posorja una cantidad más elevada de Cadmio que

los otros sitios (ver tabla 5). Respecto a los tipos de muestras, la mayor diferencia significativa con un valor de  $p = < 0,01$  fue entre hojas vs raíces y suelo vs hojas (ver figura 8).

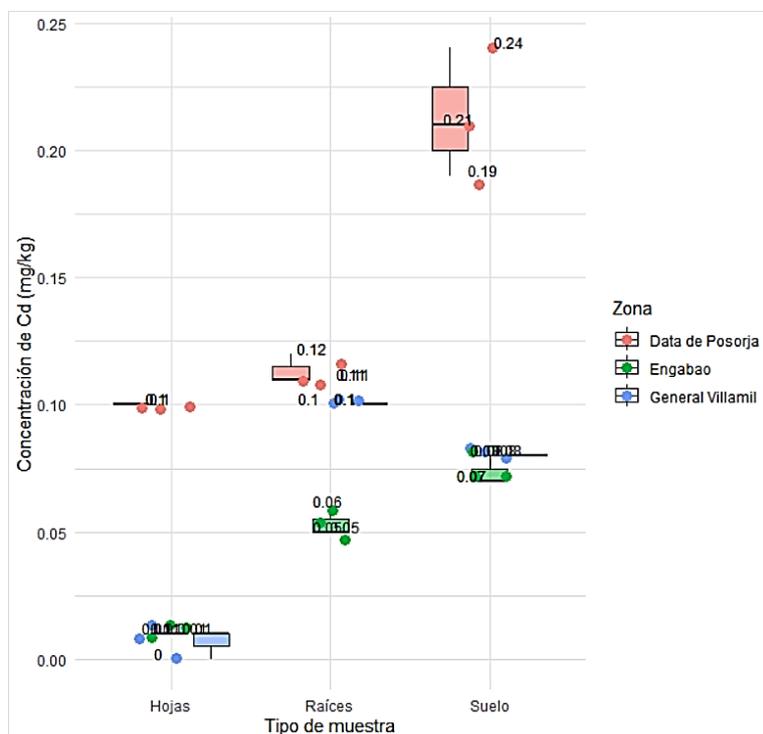


Figura 8. *Distribución de concentraciones de Cd por tipo de muestra y zona.* Fuente: Autores, 2025.

Chávez-Hernández et al. (2021) propuso tres vías de entrada de Cd en la raíz, de la cual la primera vía se basa en el ingreso a través de la membrana plasmática de las células del tejido radicular, el intercambio variado de distintos componentes da como finalización la absorción del ion de Cd en la epidermis, por lo tanto las propiedades fisicoquímicas del suelo de nuestra zona de muestreo, que cumple con condiciones alta de salinidad nos permite afirmar que la absorción de Cd ingrese por la primera vía ya mencionada (ver tabla 16 y 17).

En base a la cuantificación obtenida de Cd y Pb en los tres sitios ver tabla 19, optamos por trabajar con los valores de la zona de General Villamil Playas – El pelado.

### 4.3 Efecto de la simbiosis

#### 4.3.1 HMA en los tratamientos

Los resultados del análisis de suelo revelaron una densidad inicial de 40 esporas de HMA por 10 g de suelo en el tratamiento control. Sin embargo, se observó un aumento significativo en la densidad de esporas en los tratamientos con Cd y Pb (ver tabla 6). En cuanto a los tratamientos con 100, 250 y 500 mg/kg de Cd, se registraron 43, 48 y 52 esporas/10g, respectivamente (ver figura 9).

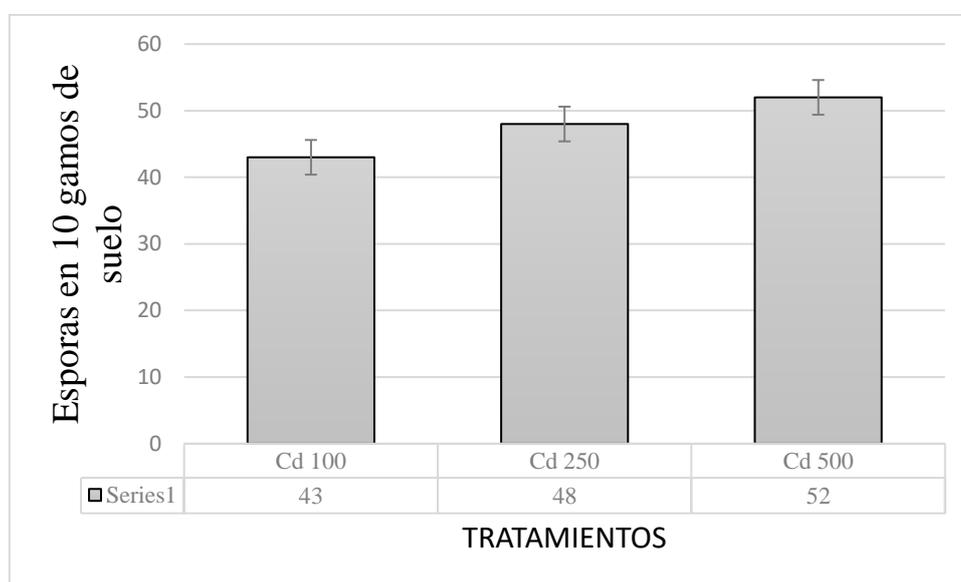


Figura 9. *Concentración de esporas en 10 g de suelo contaminado con Cd.* Fuente: Autores, 2025.

Nota: La densidad de esporas de HMA es un indicador de la capacidad de estos hongos para colonizar las raíces de las plantas y formar micorrizas. En este estudio, se evaluó el efecto de diferentes concentraciones de Cd en la densidad de esporas de HMA en suelos de playa El Pelado.

De manera similar, en los tratamientos con Pb, se observaron densidades de 46, 49 y 54 esporas/10 g para las concentraciones de 100, 250 y 500 mg/kg, la densidad de esporas aumento

hasta en un 55 % (ver figura 10). Estos resultados sugieren que la contaminación por metales pesados puede aumentar el crecimiento y desarrollo de los HMA, debido al estrés provocado.

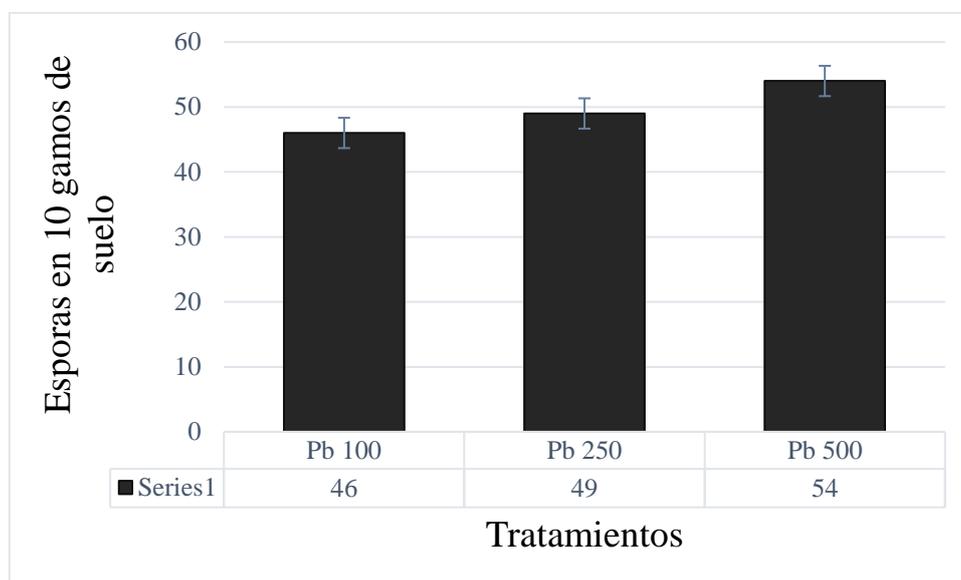


Figura 10. *Concentración de esporas en 10g de suelo contaminado con Pb.* Fuente: Autores, 2025.

Nota: La densidad de esporas de HMA es un indicador de la capacidad de estos hongos para colonizar las raíces de las plantas y formar micorrizas. En este estudio, se evaluó el efecto de diferentes concentraciones de Pb en la densidad de esporas de HMA en suelos de Playa El Pelado.

La caracterización morfológica de las esporas de HMA se llevó a cabo siguiendo criterios establecidos, considerando variables como el color, la forma, el tipo de pared y la presencia de hifas subyacentes. Esta metodología permitió identificar 2 morfotipos, entre los cuales destacaron *Acaulospora* y *Glomus*, la presencia de estos géneros indica una comunidad de HMA adaptada a condiciones de suelo contaminado con Cd (ver figura 11).

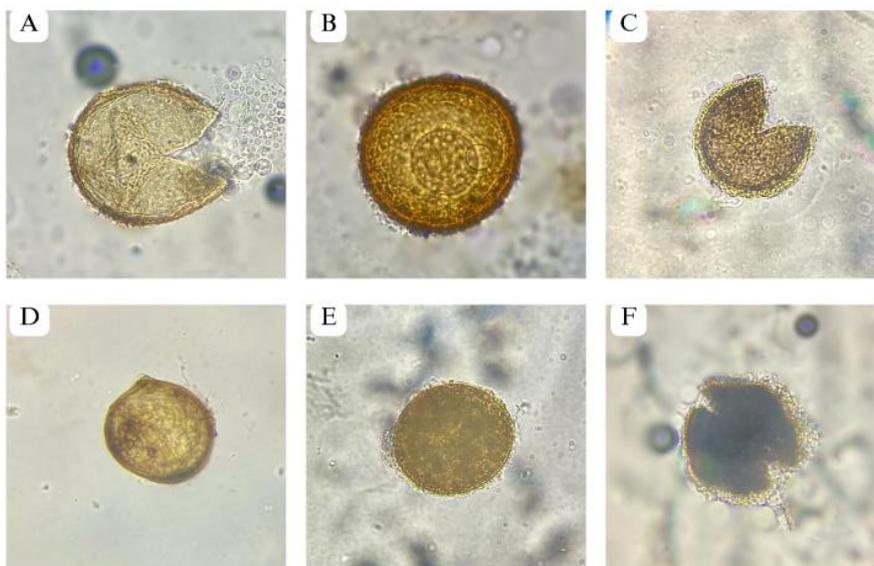


Figura 11. *Esporas de HMA en suelos contaminados con Cd.*

Nota: La caracterización morfológica de las esporas permitió identificar los géneros *Acaulospora* imagen B y *Glomus* imágenes A, C, E y F. Fuente: Los autores (2025).

A pesar de la presencia del contaminante, se observó 3 morfotipos (ver figura 12), lo que sugiere una cierta resiliencia de la comunidad de HMA a la contaminación por Pb.

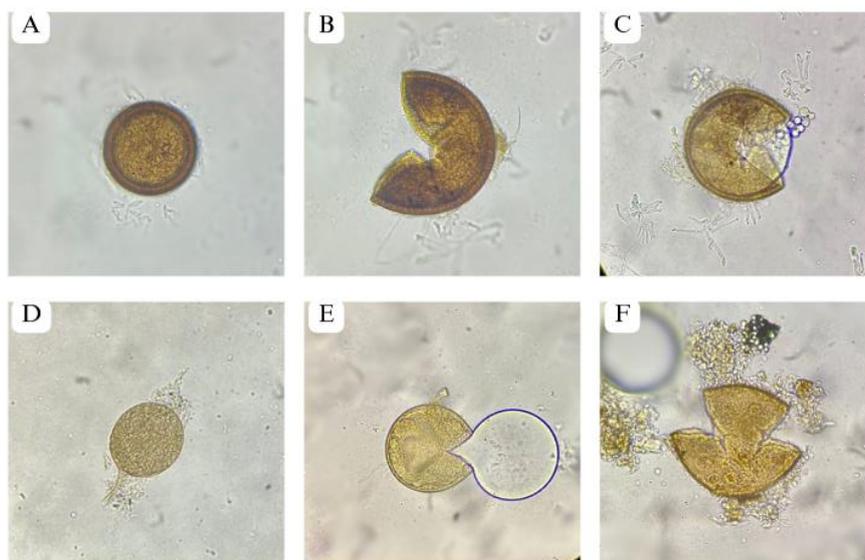


Figura 12. *Esporas de HMA en suelos contaminados con Pb.* Fuente: Los autores (2025).

Nota: El análisis de las esporas recuperadas del suelo rizosférico contaminado con Pb reveló la presencia predominante de tres géneros de HMA: *Glomus* imagen A, E y F, *Acaulospora* imagen B y C y *Gigaspora* imagen D.

Tabla 6. Efectos de los consorcios de HMA en plantas contaminadas con Cd y variables agronómicas evaluadas.

Metales pesados	HMA en los tratamientos	Tratamientos	Altura de planta	Número de esporas de HMA/10 g de suelo
Cd		ppm	cm	
Cd	T0	0	17.93±1.87	40
Cd	T1	100	17.31±1.14	43
Cd	T2	250	16.91±1.13	48
Cd	T3	500	16.66±0.99	52
Pb	T0	0	17.48±0.74	40
Pb	T1	100	17.29 ±0.76	46
Pb	T2	250	17.24±1.10	49
Pb	T3	500	17.22±1.45	54

Nota: De acuerdo con la prueba Kruskal-Wallis ( $p < 0,05$ ) no existe diferencia significativa por ende se mantiene la Hipótesis nula. Los datos se expresan como la media  $\pm$  la desviación estándar.

En un estudio reciente (Chandra et al., 2022), se exploró la interacción de HMA nativos en suelos salinos y regiones semiáridas, específicamente en plantas de *Sorghum bicolor* tolerantes a la salinidad. El análisis morfológico de las esporas reveló que la familia *Glomeraceae* predominaba en suelos sódicos. Este género se adapta a condiciones de salinidad y ecosistemas sódicos, si bien la densidad de esporas fue mayor en suelos alcalinos, esto no implica una baja densidad en suelos salinos.

De manera similar, Ghadbane et al. (2021) analizaron la capacidad de *Phoenix dactylifera* L. cultivada en suelos contaminados con Pb. Encontraron que *Glomus spp.* exhibió tolerancia a este metal y promovió el crecimiento de la planta, lo que sugiere su potencial para la fitorremediación de suelos contaminados con plomo. Es importante destacar que *Glomus spp.* demuestra ser más tolerantes a metales pesados que otros géneros.

Zalaghi et al. (2020) menciona en su investigación con tres especies de *Glomus* para evaluar la absorción de Pb, las plantas inoculadas con HMA mostraron resistencia con el metal y un mayor crecimiento significativo con las plantas no inoculadas.

#### 4.3.2 Colonización micorrízica

El porcentaje de micorrización inicial utilizado en el T0 de Cd y Pb es del 60,26 % de la zona de General Villamil en relación con Engabao y Data de Posorja, las cuales tuvieron de manera correspondiente 22,51 y 17,21 %.

La formación de estructuras micorrízicas tuvo un aumento significativo de manera creciente en cada uno de los tratamientos de Cd y Pb (ver tabla 7), estos resultados coinciden con los reportados por Riopedre-Galán et al. (2021) donde la exposición continua a un factor estresante (metal pesado) acelera la proliferación de esporas y a su vez de hifas → arbuscúlos → vesículas (figura 13).

Tabla 7. *Porcentajes de micorrización presente en cada nivel del tratamiento de Cd y Pb.*

<b>Porcentaje de micorrización</b>		
	<b>Cd (%)</b>	<b>Pb (%)</b>
<b>T0</b>	60,26	60,26
<b>T1</b>	22,80	26,67
<b>T2</b>	33,33	32,51
<b>T3</b>	43,85	38,81

Fuente: Autores, 2025.

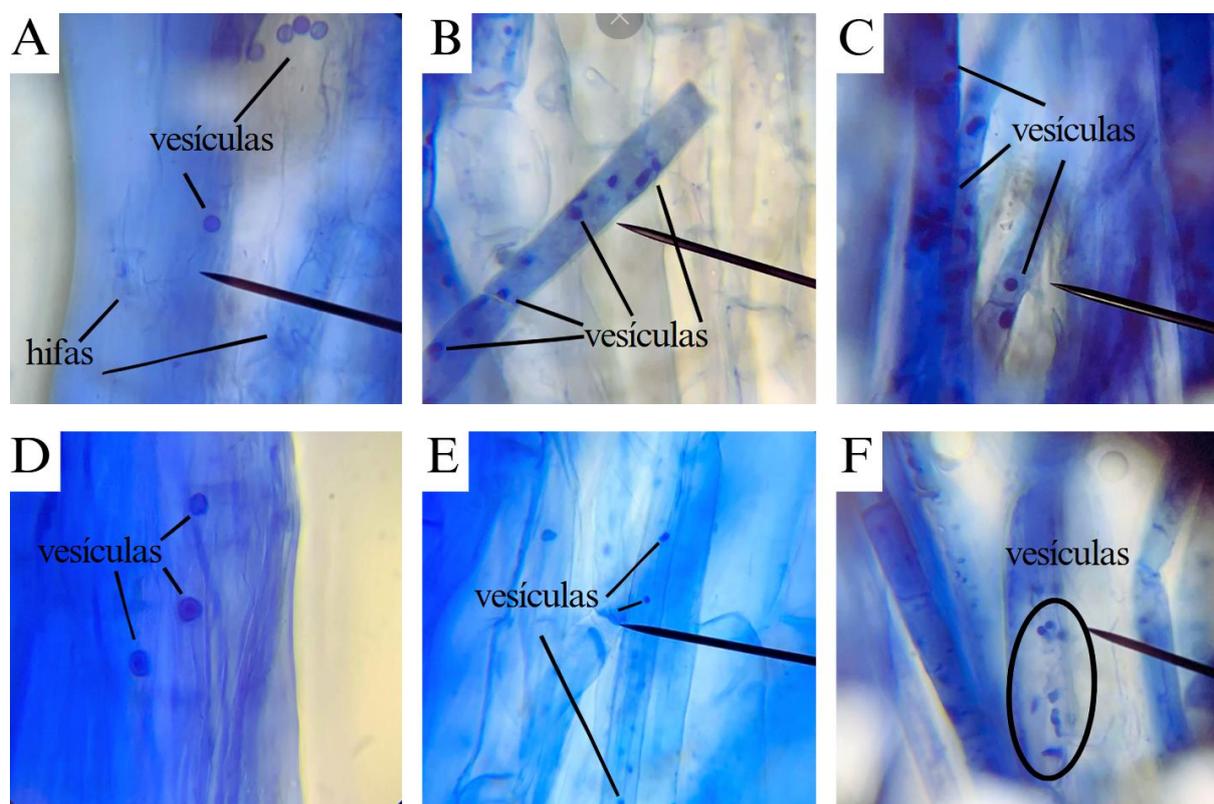


Figura 13. *Hifas y vesículas presentes en plantas sometidas a distintas concentraciones de Cd y Pb.* A = Cd 100ppm; B = Cd 250ppm; C = Cd = 500ppm; D = Pb 100ppm; E = Pb 250 ppm; F = Pb 500ppm.

#### 4.4 Bioacumulación de metales

##### 4.4.1 Acumulación en raíces

Las concentraciones de Cd y Pb presentes en el tejido radicular de *B. maritima* varían entre los diferentes tratamientos (T0 = control; resultado obtenido en la determinación inicial de metales pesados), siendo el tratamiento T2 de Pb el que presenta la mayor acumulación en el tejido radicular. De acuerdo con Meza-Ramírez et al. (2021), en un estudio orientado a la especie *Sarcocornia neei*, esta actuó como una especie fitoestabilizadora, debido a su alto porcentaje de retención en las raíces y baja traslocación hacia las zonas aéreas. Esta capacidad se atribuye a la habilidad de las raíces para inmovilizar Pb mediante la formación de enlaces con complejos presentes en la raíz, tales como los grupos funcionales en las paredes celulares,

como grupos fosfatos o carboxilos. Junto con ello, su baja afinidad por los mecanismos de transporte activo contribuye a proteger las partes aéreas de la planta. Sin embargo, la baja movilidad de un metal como el Pb también influye, pues bien, este metal pesado no suele encontrarse en formas que las plantas puedan traslocar hacia las zonas aéreas, lo que explica la mayor acumulación observada en las raíces (Mendieta Webster & Taisigüe López, 2014).

De manera parecida en Cd, el T2 tuvo una acumulación considerable con un valor de 628,31 mg/kg Cd > 109,97 mg/kg Pb, reflejando la velocidad de este metal de ser absorbidos gracias a sus propiedades químicas que lo vuelven un metal con un porcentaje mayor de solubilidad en agua, además de que la presencia del Cd como catión bivalente ( $\text{Cd}^{2+}$ ) compite con otros nutrientes esenciales como lo son el  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Zn}^{2+}$ , esta similitud química permite que el Cd sea absorbido de manera activa utilizando los mismos transportes iónicos que utilizan estos nutrientes, permitiéndole así una mayor rapidez en el sistema radicular (ver tabla 18).

Al comparar los valores del tratamiento T2 para ambos metales con los del T0 para Cd, se observa que, a pesar de que la absorción de Cd en las raíces en T2 es mayor que la de Pb (T2 Cd > T2 Pb), la concentración de Pb en T0 es mayor que la de Cd (T0 Pb > T0 Cd). Esto sugiere que, aunque el Cd presenta una mejor penetrabilidad en las raíces, su movilidad le permite biotraslocarse hacia otras zonas de la planta, mientras que el Pb se inmoviliza en las raíces (ver figura 14 y tabla 8).

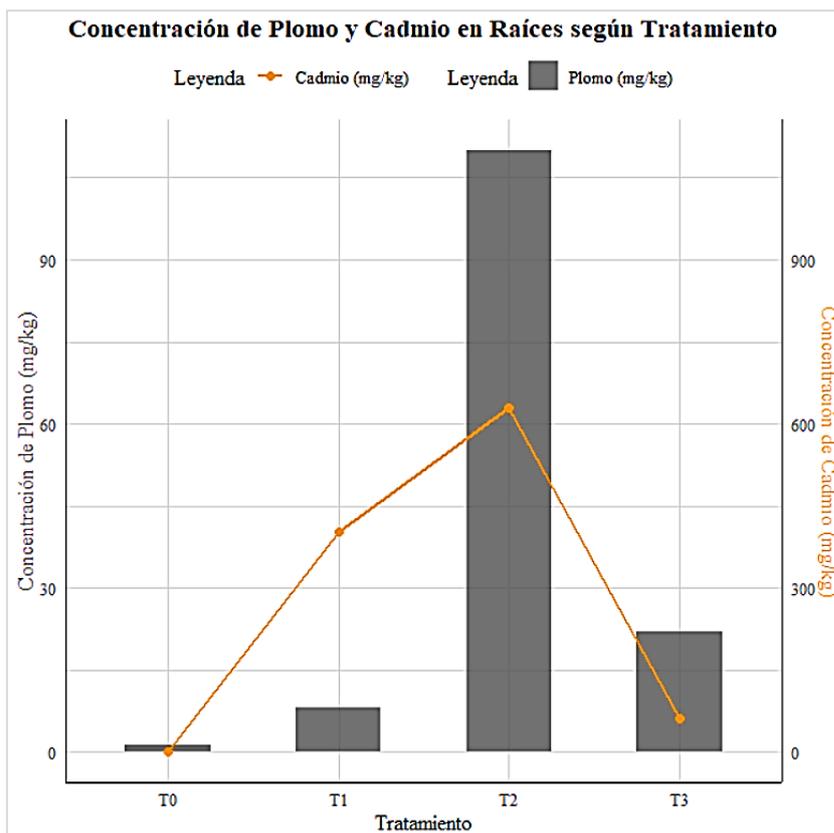


Figura 14. Niveles de Pb y Cd en raíces según dosis de tratamiento. Fuente: Autores, 2025.

Tabla 8. Evaluación de fitoestabilización de metales pesados por tratamiento.

Tratamiento	Pb Raíz	Pb Hoja	Cd Raíz	Cd Hoja	Pb Retención %	Cd Retención %
T0	1.32	0.44	0.11	0.1	75.0	52.38
T1	8.171	209.9	402.29	516.0	3.75	43.81
T2	109.97	22.97	628.31	344.93	82.72	64.56
T3	22.11	17.27	61.87	18.23	56.15	77.24

Fuente: Autores, 2025.

#### 4.4.2 Traslocación a tejidos aéreos

Los resultados de la traslocación ocurrida entre los diferentes tratamientos tuvieron una varianza significativa. El tratamiento T0 y T2 mostraron valores más alto para Cd, a diferencia del T1 y T3 donde la concentración de traslocación de Pb fue mayor (ver tabla 9). En un estudio sobre fitoextracción de Cd y Pb usando *Amaranthus hybridus* L. y micorrizas se detalló como

la formación de complejos le permite al Cd un paso de manera rápida en los diversos tejidos de la especie vegetal (Ortiz-Cano et al., 2009). Resultados similares fueron obtenidos por Huaranga Moreno et al. (2022) donde se realizó la comparación de Cd absorbido del suelo con ayuda de la especie *Zea mays* L. y *Beta vulgaris* L., donde *Z. mays* logro trascolar 1,01 % del metal presente en el suelo.

En los tratamientos restantes, T1 y T3 el Pb predomino con valores de 25,68 y 0,781 mg/kg respectivamente (ver tabla 9), según Lissette et al. (2017) las hojas de *Eichhornia crassipes* fueron capaz de aumentar su absorción al adicionarle CaCl<sub>2</sub>, la solución madre utilizada para contaminar fue PbO<sub>2</sub> en una solución acuosa por lo que las diferentes propiedades físicas y químicas del metal pueden haber favorecido su traslocación, por el contrario, Munive et al. (2020) y señala que el Pb tiene más un comportamiento fitoestabilizador fijándose en las raíces, resultados que varían con los datos obtenidos.

Tabla 9. *Traslocación de Cd y Pb presente en hojas.*

Tratamiento	Hojas		Raíces		FT	
	Pb concentración mg/kg	Cd concentración mg/kg	Pb concentración mg/kg	Cd concentración mg/kg	Pb concentración mg/kg	Cd concentración mg/kg
<b>T0</b>	0,44	0,10	1,32	0,1	0,33	1
<b>T1</b>	209,9	516	8,17	402,29	25,68	1,282
<b>T2</b>	22,97	344,93	109,97	628,31	0,2088	0,5486
<b>T3</b>	17,27	18,23	22,11	61,87	0,781	0,294
	250,14	879,16	141,57	1092,57	1,76	0,80

#### 4.4.3 Factores de bioconcentración

Al momento de evaluar el factor de bioconcentración (FBC) para cada uno de los tratamientos de los dos metales los resultados tuvieron una variabilidad entre cada metal. El Cd arrojó valores de FBC elevados en los tratamientos dando a conocer su capacidad de acumular este analito en condiciones específicas, sin embargo, en el T3 el FBC tuvo una disminución

exponencial, teniendo en cuenta que la concentración de Cd en el suelo en T3 también es un valor menor que T1 y T2, podemos correlacionar que la acumulación de Cd presente en la planta está relacionada con su concentración en el suelo (ver tabla 10).

En cuanto a los valores de FBC de Pb todos mantuvieron un índice bajo, siendo el T0 el valor más alto, teniendo un decrecimiento en los tratamientos que le precedían, resaltando así una capacidad baja de acumulación en comparación con el Cd.

Para el Cd, al momento de relacionar la planta y el suelo, podemos notar que a pesar de que las concentraciones son bajas, si se observa una afinidad, en T1 y T2 (ver tabla 10) como no lo es en el caso del Pb que, con concentraciones mucho más altas en suelo, apenas y fue absorbido por la planta, atribuyéndosele esto a su limitada biodisponibilidad.

Los valores de FBC de Cd obtenido en cada uno de los tratamientos evidencian la capacidad de *B. maritima* de absorber este metal y translocarlo al tejido aéreo, siendo así una hiperacumuladora de metales pesado, siendo útil en procesos de fitorremediación, y aunque no se puede decir lo mismo sobre la absorción de Pb, puede contribuir a su uso en procesos de inmovilización para reducir su impacto ambiental.

Tabla 10. Factores de bioconcentración (FBC) para cada Cd y Pb.

Tratamiento	Metal Planta Pb (mg/kg)	Metal Suelo Pb (mg/kg)	FBC Pb	Metal planta Cd (mg/kg)	Metal Suelo Cd (mg/kg)	FBC Cd
T0	1.76	2.58	0.68217	0.11	0.08	1,375
T1	218.071	387.96	0.56209	918.29	1.374	668.333
T2	132.94	877.96	0.15141	973.24	1.141	852.97
T3	39.38	927.00	0.04248	80.1	1.69	47.396

Nota: Si FBC < 1, no acumula una concentración mayor de metal que la presente en el suelo.; Si FBC > 1, acumula una concentración mayor de metal que la presente en el suelo. Fuente: Autores, 2025

#### 4.4.4 Efecto de la tolerancia a metales

El análisis de los suelos nativos en las tres zonas perturbadas permitió identificar dos géneros predominantes de HMA: *Glomus* y *Acaulospora*, con una densidad inicial de 40 esporas por cada 10 g de suelo. Sin embargo, la presencia de estos hongos varió entre las zonas estudiadas. General Villamil Playas – El Pelado presentó el mayor porcentaje de micorrización con un 60.26%, seguido de Engabao con 22 % y Data de Posorja con 17.5%. Este resultado sugiere que la mayor diversidad botánica en General Villamil favorece la proliferación de estos microorganismos, promoviendo su relación simbiótica con especies vegetales como *B. maritima*. A su vez, esta asociación podría haber jugado un papel clave en la adaptación de la planta a las condiciones adversas del suelo, ya que en esta zona las concentraciones de Cd y Pb superaron los límites permisibles.

El análisis de la retención de metales pesados en el sistema radicular de *B. maritima* permitió comprender mejor cómo interactúan el Cd y el Pb con la planta. En el caso del Pb, se evidenció una retención del 82 % en las raíces, lo que confirma su limitada movilidad dentro del sistema vegetal (Chávez-Hernández et al., 2021). Esta acumulación se debe a que el Pb no es un elemento esencial para las plantas, por lo que su absorción es restringida por barreras naturales como las paredes celulares, que impiden su paso hacia otros tejidos. Además, *B. maritima* demostró mecanismos de defensa frente al estrés causado por la contaminación por Pb, actuando como una planta hiperacumuladora con un alto valor de bioconcentración. Estos resultados sugieren que podría ser una especie con gran potencial para la fitorremediación y fitoextracción en suelos contaminados.

Por otro lado, el Cd mostró un menor porcentaje de retención en comparación con el Pb, pero su factor de biotraslocación fue mayor. Esto se debe a sus propiedades químicas, que lo hacen similar a nutrientes esenciales como  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Zn}^{2+}$ , facilitando su absorción sin

restricciones por parte de la planta. A diferencia del Pb, el Cd no encuentra barreras naturales que impidan su ingreso, y su alta solubilidad en agua facilita aún más su movilidad dentro del sistema vegetal (López, 2025).

## 4.5 Desarrollo vegetal

### 4.5.1 Parámetros de crecimiento

Los resultados indicaron que no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos para ninguna de las variables analizadas (ver anexo 5). En el caso de la altura ( $p = 0.$ ), el ancho de tallo ( $p = 0.436$ ) y el número de hojas ( $p = 0.515$ ), los valores de significancia superaron el umbral estándar ( $\alpha = 0.05$ ), evidenciando que los tratamientos no generaron un impacto relevante en las características morfológicas estudiadas (ver figura 15 y tabla 11).

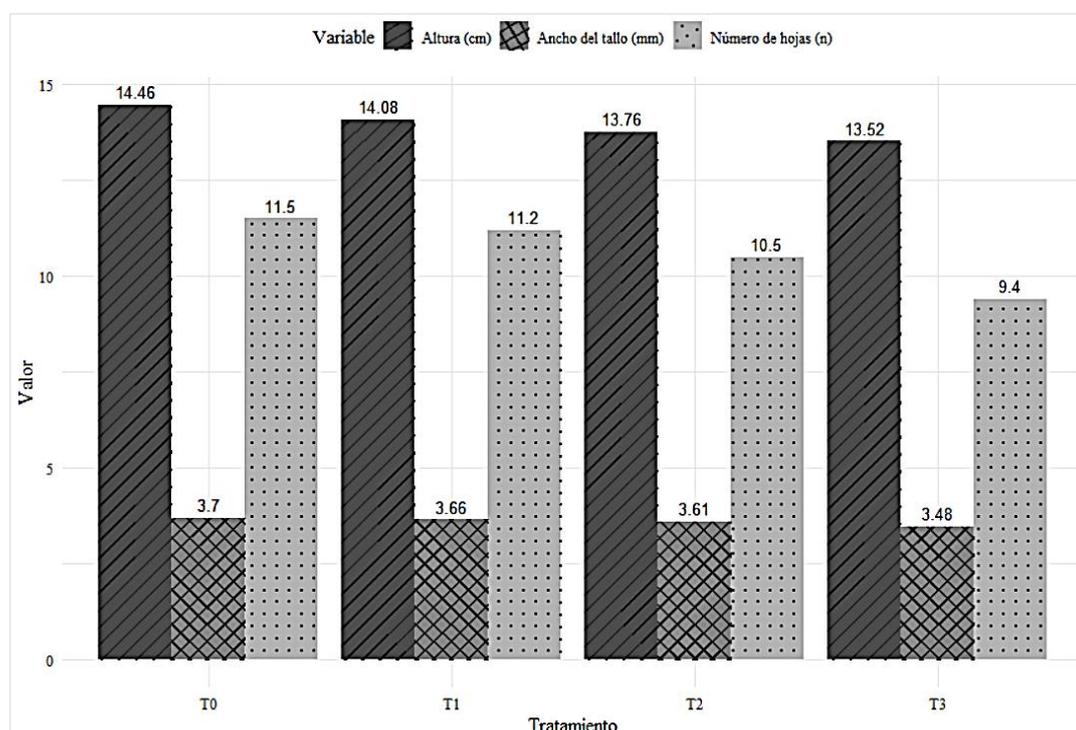


Figura 15. Comparación de variables por tratamiento. Fuente: Autores, 2025.

Estos hallazgos podrían estar relacionados con la duración limitada del experimento (tres semanas). Sin embargo, a nivel químico hubo diferencia significativa con un

decrecimiento de la clorofila esto puede deberse a las afectaciones de los metales pesados en la biosíntesis de pigmentos fotosintéticos como menciona González Moreno, Perales Vela y Salcedo Álvarez (2008).

Tabla 11. *Análisis post hoc de Tukey para variables morfológicas según tratamiento.*

<b>Altura (cm)</b>			<b>Ancho del tallo (mm)</b>			<b>Número de hojas (n)</b>		
<b>HSD Tukey<sup>a,b</sup></b>			<b>HSD Tukey<sup>a,b</sup></b>			<b>HSD Tukey<sup>a,b</sup></b>		
<b>Tratamiento</b>	<b>N</b>	<b>Subconjunto</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>N</b>	<b>Subconjunto</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>N</b>	<b>Subconjunto</b>
		1			1			1
<b>T3</b>	10	13,52	<b>T1</b>	10	3,48	<b>T3</b>	10	9,40
<b>T2</b>	10	13,76	<b>T0</b>	10	3,61	<b>T1</b>	10	10,50
<b>T1</b>	10	14,08	<b>T2</b>	10	3,66	<b>T0</b>	10	11,20
<b>T0</b>	10	14,46	<b>T3</b>	10	3,70	<b>T2</b>	10	11,50
<b>Sig.</b>		0,991	<b>Sig.</b>		0,827	<b>Sig.</b>		0,515

## Capítulo 5

### Conclusiones y recomendaciones

#### 5.1 Conclusiones

Se evidencio varios morfotipos de HMA nativos en suelo rizosférico en las plantas halófitas de la especie *B. maritima* en las tres zonas evaluadas, playa el Pelado presenta una mayor comunidad, por tal motivo se concluye que la relación simbiótica entre planta-HMA es beneficiosa para su adaptación y crecimientos en condiciones adversas. Los géneros *Glomus* y *Acaulospora* predominan en el suelo, junto con la densidad se establece que existe un ambiente óptimo para la simbiosis de micorrizas.

De las tres zonas iniciales Data de Posorja consto con una cantidad superior de Cd y Pb presente en las diversas muestras a excepción del suelo, donde General Villamil predomino, la presencia de estos compuestos tóxicos puede estar relacionado a las actividades antropogénicas que se realizan de manera cercana a los estuarios donde las muestras fueron recolectadas.

La relación simbiótica planta-HMA demostró una alta eficacia al aumentar la capacidad de *B. maritima* a retener los metales pesados presentes en el suelo con el fin de evitar una mayor intoxicación que degrade las estructuras internas y/o externas permitiéndole un desarrollo vegetal normal.

## 5.2 Recomendaciones

Se recomienda en futuras investigaciones un análisis molecular para la identificación morfológica y obtener una caracterización más precisa de los HMA presente en estas zonas costeras.

Se recomienda realizar un monitoreo estacional para evaluar la variación temporal de las concentraciones de Cd y Pb y su relación con los factores medioambientales.

Evaluar en condiciones controladas la bioacumulación de Cd y Pb en *B. maritima* con la inoculación de HMA nativas.

Realizar estudios a largo plazo y evaluar la sostenibilidad de la simbiosis plantas-HMA y la efectividad en la fitorremediación y fitoextracción bajo diferentes condiciones de estrés.

Realizar un inóculo de HMA nativas que estén adaptadas a estrés salino para la adaptación de las plantas no halófitas a suelos con condiciones de alta salinidad.

## Referencias bibliográficas

(Guayaquil, Ecuador). *Brazilian Journal Of Development*, 10(1), 1190-1207.  
<https://doi.org/10.34117/bjdv10n1-078>

(Guayaquil, Ecuador). *Brazilian Journal Of Development*, 10(1), 1190-1207.  
<https://doi.org/10.34117/bjdv10n1-078>

¿Qué son los metales pesados? (2023, 3 octubre). Orientación - Ministerio de Salud - Plataforma del Estado Peruano. [https://www.gob.pe/47991-que-son-los-metales-pesados?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.gob.pe/47991-que-son-los-metales-pesados?utm_source=chatgpt.com)

¿Qué son los metales pesados? (2023, 3 octubre). Orientación - Ministerio de Salud - Plataforma del Estado Peruano. [https://www.gob.pe/47991-que-son-los-metales-pesados?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.gob.pe/47991-que-son-los-metales-pesados?utm_source=chatgpt.com)

Aguilar-Paredes, A., Turrini, A., Avio, L., Stuardo, C., Velásquez, A., Becerra, J., Giovannetti, M., & Seeger, M. (2024). Agricultural Managements Influence the Diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Vineyards from Chilean Mediterranean Climate Ecosystems. *Journal Of Soil Science And Plant Nutrition*, 24(3), 6099-6112. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01963-y>

Aguilar-Paredes, A., Turrini, A., Avio, L., Stuardo, C., Velásquez, A., Becerra, J., Giovannetti, M., & Seeger, M. (2024). Agricultural Managements Influence the Diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Vineyards from Chilean Mediterranean Climate Ecosystems. *Journal Of Soil Science And Plant Nutrition*, 24(3), 6099-6112. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01963-y>

Alexander, D. E. (2006). Bioaccumulation, bioconcentration, biomagnification. En *Environmental Geology* (pp. 43-44). [https://doi.org/10.1007/1-4020-4494-1\\_31](https://doi.org/10.1007/1-4020-4494-1_31)

Alexander, D. E. (2006). Bioaccumulation, bioconcentration, biomagnification. En *Environmental Geology* (pp. 43-44). [https://doi.org/10.1007/1-4020-4494-1\\_31](https://doi.org/10.1007/1-4020-4494-1_31)

Angélica, S. R., Adriana, C. R. M., Rolando, D. F., Hugo, F. P., Renato, G. Z., De la Luz, M. G. M., & Neaman, A. (2007). Métodos de análisis de tejidos vegetales. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/8570>

Angélica, S. R., Adriana, C. R. M., Rolando, D. F., Hugo, F. P., Renato, G. Z., De la Luz, M. G. M., & Neaman, A. (2007). Métodos de análisis de tejidos vegetales. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/8570>

Bekmirzaev, G., Ouddane, B., Beltrao, J., Khamidov, M., Fujii, Y., & Sugiyama, A. (2021). Effects of Salinity on the Macro- and Micronutrient Contents of a Halophytic Plant Species (*Portulaca oleracea* L.). *Land*, 10(5), 481. <https://doi.org/10.3390/land10050481>

Bekmirzaev, G., Ouddane, B., Beltrao, J., Khamidov, M., Fujii, Y., & Sugiyama, A. (2021). Effects of Salinity on the Macro- and Micronutrient Contents of a Halophytic Plant Species (*Portulaca oleracea* L.). *Land*, 10(5), 481. <https://doi.org/10.3390/land10050481>

Bencherif, K., Laruelle, F., Tisserant, B., Dalpé, Y., & Sahraoui, A. L. (2023). Engineering Approach for Production of Arbuscular Mycorrhizal Inoculum Adapted to Saline Soil Management. *Stresses*, 3(2), 404-423. <https://doi.org/10.3390/stresses3020030>

Cadmio (Cd) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente. (s. f.-b). <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cd.htm>

Cadmio (Cd) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente. (s. f.-b).

<https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cd.htm>

Carrillo-Saucedo, S. M., Puente-Rivera, J., Montes-Recinas, S., & Cruz-Ortega, R. (2022). Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta Botanica Mexicana*, 129.

<https://doi.org/10.21829/abm129.2022.1932>

Carrillo-Saucedo, S. M., Puente-Rivera, J., Montes-Recinas, S., & Cruz-Ortega, R. (2022). Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta Botanica Mexicana*, 129.

<https://doi.org/10.21829/abm129.2022.1932>

Castro, D., & Chang, J. (2015). Principales Estuarios del Ecuador. ResearchGate.

[https://www.researchgate.net/publication/283294802\\_Principales\\_Estuarios\\_del\\_Ecuador](https://www.researchgate.net/publication/283294802_Principales_Estuarios_del_Ecuador)

Castro, D., & Chang, J. (2015). Principales Estuarios del Ecuador. ResearchGate.

[https://www.researchgate.net/publication/283294802\\_Principales\\_Estuarios\\_del\\_Ecuador](https://www.researchgate.net/publication/283294802_Principales_Estuarios_del_Ecuador)

CDC updates blood lead reference value [en línea]. Atlanta: Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades de los Estados Unidos; 2024 (<https://www.cdc.gov/lead-prevention/php/news-features/updates-blood-lead-reference-value.html>).

CDC updates blood lead reference value [en línea]. Atlanta: Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades de los Estados Unidos; 2024 (<https://www.cdc.gov/lead-prevention/php/news-features/updates-blood-lead-reference-value.html>).

Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN) y Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP). (2012).

Clima e Hidrología del Cantón Playas: Generación de geoinformación para la gestión del

territorio a nivel nacional, escala 1:25.000. Instituto Geográfico Militar. Recuperado de [https://www.geoportalmg.gov.ec/descargas\\_prueba/playas.html](https://www.geoportalmg.gov.ec/descargas_prueba/playas.html)

Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos (CLIRSEN) y Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP). (2012). Clima e Hidrología del Cantón Playas: Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional, escala 1:25.000. Instituto Geográfico Militar. Recuperado de [https://www.geoportalmg.gov.ec/descargas\\_prueba/playas.html](https://www.geoportalmg.gov.ec/descargas_prueba/playas.html)

Chandra, P., Singh, A., Prajapat, K., Rai, A. K., & Yadav, R. K. (2022b). Native arbuscular mycorrhizal fungi improve growth, biomass yield, and phosphorus nutrition of sorghum in saline and sodic soils of the semi-arid region. *Environmental And Experimental Botany*, 201, 104982. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104982>

Chávez-Hernández, C. G., Aguilar, C. C. B., Espinosa, G. J. T., Chimal-Sánchez, E., & García-Sánchez, R. (2021). Colonización micorrízica y comunidades de hongos micorrizógenos arbusculares en plantas medicinales del bosque templado “Agua Escondida”, Taxco, Guerrero, México. *Scientia Fungorum*, 51, e1325. <https://doi.org/10.33885/sf.2021.51.1325>

Coyago, E., & Bonilla, S. (2019). Cinética de absorción de plomo en especies vegetativas previo a procesos de fitorremediación de suelos altamente contaminados. *Revista Alfa*, 3(7), 47–58. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v3i7.54>

CSIL Centre for Industrial Studies. (2008). El impacto del turismo en las regiones costeras: Aspectos de desarrollo regional. Parlamento Europeo. <https://www.europarl.europa.eu/activities/expert/eStudies.do?language=EN>

CSIL Centre for Industrial Studies. (2008). El impacto del turismo en las regiones costeras: Aspectos de desarrollo regional. Parlamento Europeo. <https://www.europarl.europa.eu/activities/expert/eStudies.do?language=EN>

D'Entremont, T. W., López-Gutiérrez, J. C., & Walker, A. K. (2021). Inoculating rhizome-propagated *Sporobolus pumilus* with a native mycorrhizal fungus increases salt marsh plant growth and survival. *FACETS*, 6, 1134-1145. <https://doi.org/10.1139/facets-2020-0104>

Diego-Pérez, N., Fonseca, R. M., Rzedowski, J., & Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. (2005). Flora de Guerrero: Bataceae rhizophoraceae (Núm. 22). Facultad de Ciencias, UNAM. [https://books.google.com.ec/books/about/Flora\\_de\\_Guerrero\\_Bataceae\\_rhizophoraceae.html?id=zPq-tzywhzYC&redir\\_esc=y](https://books.google.com.ec/books/about/Flora_de_Guerrero_Bataceae_rhizophoraceae.html?id=zPq-tzywhzYC&redir_esc=y) (ISBN 9683607659, 9789683607652)

Diego-Pérez, N., Fonseca, R. M., Rzedowski, J., & Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. (2005). Flora de Guerrero: Bataceae rhizophoraceae (Núm. 22). Facultad de Ciencias, UNAM. [https://books.google.com.ec/books/about/Flora\\_de\\_Guerrero\\_Bataceae\\_rhizophoraceae.html?id=zPq-tzywhzYC&redir\\_esc=y](https://books.google.com.ec/books/about/Flora_de_Guerrero_Bataceae_rhizophoraceae.html?id=zPq-tzywhzYC&redir_esc=y) (ISBN 9683607659, 9789683607652)

Galapagos Species Database, *Batis maritima*", dataZone. Charles Darwin Foundation, <https://datazone.darwinfoundation.org/es/checklist?species=200>. Accessed 20 January 2025.

Galapagos Species Database, *Batis maritima*", dataZone. Charles Darwin Foundation, <https://datazone.darwinfoundation.org/es/checklist?species=200>. Accessed 20 January 2025.

Ghadbane, M., Medjekal, S., Benderradji, L., Belhadj, H., & Daoud, H. (2021). Assessment of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Status and Rhizobium on Date Palm (*Phoenix dactylifera* L.)

Cultivated in a Pb Contaminated Soil. En Environmental science and engineering (pp. 703-707).  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-51210-1\\_111](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51210-1_111)

González Moreno, S., Perales Vela, H., & Salcedo Álvarez, M. O. (2008). La fluorescencia de la clorofila a como herramienta en la investigación de efectos tóxicos en el aparato fotosintético de plantas y algas. *Revista de Educación Bioquímica*, 27(4), 119-129. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/237035517>

Ha, M. H., Morrow, M., & Algiers, K. (2022, 2 diciembre). 4.5.2: Translocation (Assimilate transport). *Biology*. LibreTexts.  
[https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Botany/Botany\\_%28Ha\\_Morrow\\_and\\_Algiers%29/04%3A\\_Plant\\_Physiology\\_and\\_Regulation/4.05%3A\\_Transport/4.5.02%3A\\_Translocation\\_%28Assimilate\\_Transport%29](https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Botany/Botany_%28Ha_Morrow_and_Algiers%29/04%3A_Plant_Physiology_and_Regulation/4.05%3A_Transport/4.5.02%3A_Translocation_%28Assimilate_Transport%29)

Ha, M. H., Morrow, M., & Algiers, K. (2022, 2 diciembre). 4.5.2: Translocation (Assimilate transport). *Biology*. LibreTexts.  
[https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Botany/Botany\\_%28Ha\\_Morrow\\_and\\_Algiers%29/04%3A\\_Plant\\_Physiology\\_and\\_Regulation/4.05%3A\\_Transport/4.5.02%3A\\_Translocation\\_%28Assimilate\\_Transport%29](https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Botany/Botany_%28Ha_Morrow_and_Algiers%29/04%3A_Plant_Physiology_and_Regulation/4.05%3A_Transport/4.5.02%3A_Translocation_%28Assimilate_Transport%29)

Hasanuzzaman, Mirza & Bhuyan, M.H.M. & Nahar, Kamrun & Hossain, Md. Shahadat & Mahmud, Jubayer Al & Hossen, Md & Fujita, Masayuki. (2018). Potassium: A Vital Regulator of Plant Responses and Tolerance to Abiotic Stresses. *Agronomy*. 8. 10.3390/agronomy8030031.

Hasanuzzaman, Mirza & Bhuyan, M.H.M. & Nahar, Kamrun & Hossain, Md. Shahadat & Mahmud, Jubayer Al & Hossen, Md & Fujita, Masayuki. (2018). Potassium: A Vital Regulator

of Plant Responses and Tolerance to Abiotic Stresses. *Agronomy*. 8. 10.3390/agronomy8030031.

Hernández-Baranda, Yenisei, Rodríguez-Hernández, Pedro, Peña-Icart, Mirella, Meriño-Hernández, Yanitza, & Cartaya-Rubio, Omar. (2019). Toxicidad del Cadmio en las plantas y estrategias para disminuir sus efectos. Estudio de caso: El tomate. *Cultivos Tropicales*, 40(3), . Epub 01 de septiembre de 2019. Recuperado en 28 de enero de 2025, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362019000300010&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362019000300010&lng=es&tlng=es).

Hernández-Baranda, Yenisei, Rodríguez-Hernández, Pedro, Peña-Icart, Mirella, Meriño-Hernández, Yanitza, & Cartaya-Rubio, Omar. (2019). Toxicidad del Cadmio en las plantas y estrategias para disminuir sus efectos. Estudio de caso: El tomate. *Cultivos Tropicales*, 40(3), . Epub 01 de septiembre de 2019. Recuperado en 28 de enero de 2025, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362019000300010&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362019000300010&lng=es&tlng=es).

Ho-Plágaro, T., Tamayo-Navarrete, M. I., & García-Garrido, J. M. (2020). Histochemical Staining and Quantification of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Colonization. *Methods In Molecular Biology*, 43-52. [https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0603-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0603-2_4)

Ho-Plágaro, T., Tamayo-Navarrete, M. I., & García-Garrido, J. M. (2020). Histochemical Staining and Quantification of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Colonization. *Methods In Molecular Biology*, 43-52. [https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0603-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0603-2_4)

Instituto de Sanimetría y Evaluación Sanitaria. Lead exposure-Level 3 risk [en línea]. Seattle: Universidad de Washington (Estados Unidos de América); 2024

(<https://www.healthdata.org/research-analysis/diseases-injuries-risks/factsheets/2021-lead-exposure-level-3-risk>).

Instituto de Sanimetría y Evaluación Sanitaria. Lead exposure-Level 3 risk [en línea]. Seattle: Universidad de Washington (Estados Unidos de América); 2024 (<https://www.healthdata.org/research-analysis/diseases-injuries-risks/factsheets/2021-lead-exposure-level-3-risk>).

Llugany, M., Tolrá, R., Poschnrieder, C., & Barceló, J. (2007). Hiperacumulación de metales: ¿una ventaja para la planta y para el hombre? . *Ecosistemas*, 16(2). Recuperado a partir de <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/124>

Llugany, M., Tolrá, R., Poschnrieder, C., & Barceló, J. (2007). Hiperacumulación de metales: ¿una ventaja para la planta y para el hombre? . *Ecosistemas*, 16(2). Recuperado a partir de <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/124>

López Hernández, M. E. ., & Morales Hernández, O. E. . (2022). Fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados: una revisión. *Revista Ciencia Y Tecnología El Higo*, 12(2), 15–28. <https://doi.org/10.5377/elhigo.v12i2.15197>

López Hernández, M. E. ., & Morales Hernández, O. E. . (2022). Fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados: una revisión. *Revista Ciencia Y Tecnología El Higo*, 12(2), 15–28. <https://doi.org/10.5377/elhigo.v12i2.15197>

Lopez, C. (2025, 21 enero). Metales pesados: el daño invisible a la salud humana y ecosistémica. *Revista Endémico*. <https://endemico.org/metales-pesados-el-dano-invisible-a-la-salud-humana-y-ecosistemica/>

Lopez, C. (2025, 21 enero). Metales pesados: el daño invisible a la salud humana y ecosistémica. Revista Endémico. <https://endemico.org/metales-pesados-el-dano-invisible-a-la-salud-humana-y-ecosistemica/>

López, L. Á. A., Hernández, M. A. L., & Alvarez-Bernal, D. (2023). Efecto de diferentes bioles, obtenidos a partir de halófitas, en la germinación y crecimiento de cuatro variedades de hortalizas. *BIOTecnia*, 25(3), 197-207. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v25i3.2127>

Marquez, N., Irazoqui, J. M., Ciacci, M. B., Amadio, A. F., Fernandez, F. D., & Giachero, M. L. (2024). Analysis of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) community composition associated with alkaline saline sodic soils. *bioRxiv* (Cold Spring Harbor Laboratory). <https://doi.org/10.1101/2024.02.01.578375>

Mendarte-Alquisira, C., Alarcón, A., & Ferrera-Cerrato, R. (2021). Fitorremediación: Alternativa biotecnológica para recuperar suelos contaminados con DDT. Una revisión. *Tip revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 24. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2021.326>

Mendarte-Alquisira, C., Alarcón, A., & Ferrera-Cerrato, R. (2021). Fitorremediación: Alternativa biotecnológica para recuperar suelos contaminados con DDT. Una revisión. *Tip revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 24. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2021.326>

Moína-Quimí, E., Oviedo Anchundia, R., Nieto-Barcelona, S., Herrera-Samaniego, P., & Barcos-Arias, M. (2018). Evaluación de los hongos micorrízicos arbusculares de zonas del trópico húmedo del Ecuador. *Bionatura*, 3(1), 9. <https://doi.org/10.21931/RB/2018.03.01.9>

Moína-Quimí, E., Oviedo Anchundia, R., Nieto-Barcelona, S., Herrera-Samaniego, P., & Barcos-Arias, M. (2018). Evaluación de los hongos micorrízicos arbusculares de zonas del trópico húmedo del Ecuador. *Bionatura*, 3(1), 9. <https://doi.org/10.21931/RB/2018.03.01.9>

Moncada, U. A. P., Gómez, M. M. R., Ordoñez, D. P. S., Rolón, A. M. P., Ortiz, W. A. W., Ramírez, L., & Estrada, G. A. R. (2019). Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) como estrategia para reducir la absorción de cadmio en plantas de cacao (*Theobroma cacao*). *Terra Latinoamericana*, 37(2), 121. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.479>

Moncada, U. A. P., Gómez, M. M. R., Ordoñez, D. P. S., Rolón, A. M. P., Ortiz, W. A. W., Ramírez, L., & Estrada, G. A. R. (2019). Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA) como estrategia para reducir la absorción de cadmio en plantas de cacao (*Theobroma cacao*). *Terra Latinoamericana*, 37(2), 121. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.479>

Navarrete-Forero, G., Baren, L. M., Dominguez-Granda, L., Cevallos, J. P., & Jarrín, J. R. M. (2019). HEAVY METALS CONTAMINATION IN THE GULF OF GUAYAQUIL: EVEN LIMITED DATA REFLECTS ENVIRONMENTAL IMPACTS FROM ANTHROPOGENIC ACTIVITY. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(3), 731-755. <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.03.18>

Navarrete-Forero, G., Baren, L. M., Dominguez-Granda, L., Cevallos, J. P., & Jarrín, J. R. M. (2019). HEAVY METALS CONTAMINATION IN THE GULF OF GUAYAQUIL: EVEN LIMITED DATA REFLECTS ENVIRONMENTAL IMPACTS FROM ANTHROPOGENIC ACTIVITY. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(3), 731-755. <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.03.18>

Neaman, A. (2022). Fitoextracción de metales desde suelos contaminados: Una idea utópica. *Idesia*, 40(4), 2–5. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292022000400002>

Neaman, A. (2022). Fitoextracción de metales desde suelos contaminados: Una idea utópica. *Idesia*, 40(4), 2–5. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292022000400002>

NTP Toxicity Studies of Cadmium Oxide (CAS No. 1306-19-0) Administered by Inhalation to F344/N Rats and B6C3F1 Mice. (1995). *PubMed*, 39, 1-D3. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11965238>

NTP Toxicity Studies of Cadmium Oxide (CAS No. 1306-19-0) Administered by Inhalation to F344/N Rats and B6C3F1 Mice. (1995). *PubMed*, 39, 1-D3. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11965238>

Núñez López, R. A., Meas Vong, Y., Ortega Borges, R., & Olguín, E. J. (2020). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Revista Ciencia*, 55(3), 69-83.

Núñez López, R. A., Meas Vong, Y., Ortega Borges, R., & Olguín, E. J. (2020). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Revista Ciencia*, 55(3), 69-83.

Ortiz, W. A. W., Gómez, M. M. R., Moncada, U. A. P., Ordoñez, D. P. S., Rolon, A. M. P., & Ramírez, L. (2019). Asociación de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) con plantas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) para la producción de panela en Colombia. *Terra Latinoamericana*, 37(2), 175. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.481>

Ortiz, W. A. W., Gómez, M. M. R., Moncada, U. A. P., Ordoñez, D. P. S., Rolon, A. M. P., & Ramírez, L. (2019). Asociación de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) con plantas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) para la producción de panela en Colombia. *Terra Latinoamericana*, 37(2), 175. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i2.481>

Remoción de cadmio en muestras de agua del estero El Macho, Machala-Ecuador, utilizando como adsorbente espuma de poliuretano activada con nanopartículas de plata. (2024).

NOVASINERGIA REVISTA DIGITAL DE CIENCIA INGENIERÍA y TECNOLOGÍA, 7(2), 36-51. <https://doi.org/10.37135/ns.01.14.03>

Remoción de cadmio en muestras de agua del estero El Macho, Machala-Ecuador, utilizando como adsorbente espuma de poliuretano activada con nanopartículas de plata. (2024). NOVASINERGIA REVISTA DIGITAL DE CIENCIA INGENIERÍA y TECNOLOGÍA, 7(2), 36-51. <https://doi.org/10.37135/ns.01.14.03>

Riopedre-Galán, T., Delgado-Álvarez, A., Cabrera-Rodríguez, J. A., & Cartaya-Rubio, O. E. (2021). Relación entre los metales pesados y los hongos formadores de micorrizas arbusculares. *Cultivos Tropicales*, 42(4).

Riopedre-Galán, T., Delgado-Álvarez, A., Cabrera-Rodríguez, J. A., & Cartaya-Rubio, O. E. (2021). Relación entre los metales pesados y los hongos formadores de micorrizas arbusculares. *Cultivos Tropicales*, 42(4).

Royal Botanic Gardens, Kew (2022) Plants of the world online POWO (2022): Plants of the world online. Published on the Internet; <https://powo.science.kew.org/>

Royal Botanic Gardens, Kew (2022) Plants of the world online POWO (2022): Plants of the world online. Published on the Internet; <https://powo.science.kew.org/>

Saladilla - *Batis maritima* (Taxonomía, Características, Distribución, Imágenes). (s. f.). PictureThis. [https://www.picturethisai.com/es/wiki/Batis\\_maritima.html](https://www.picturethisai.com/es/wiki/Batis_maritima.html)

Saladilla - *Batis maritima* (Taxonomía, Características, Distribución, Imágenes). (s. f.). PictureThis. [https://www.picturethisai.com/es/wiki/Batis\\_maritima.html](https://www.picturethisai.com/es/wiki/Batis_maritima.html)

Sarmiento, L., & Rodríguez, M. (2021, 27 diciembre). La simbiosis entre hongos y plantas, un ejemplo de colaboración y beneficio mutuo. Academia de Ciencias de Morelos, A.C. Recuperado 20 de enero de 2025, de <https://www.acmor.org/publicaciones/la-simbiosis-entre-hongos-y-plantas-un-ejemplo-de-colaboraci-n-y-beneficio-mutuo>

Sarmiento, L., & Rodríguez, M. (2021, 27 diciembre). La simbiosis entre hongos y plantas, un ejemplo de colaboración y beneficio mutuo. Academia de Ciencias de Morelos, A.C. Recuperado 20 de enero de 2025, de <https://www.acmor.org/publicaciones/la-simbiosis-entre-hongos-y-plantas-un-ejemplo-de-colaboraci-n-y-beneficio-mutuo>

Scopel, B. . R., Miranda, PHO de, Silva, RS da ., Alves, JV de O. ., Veras, BO de, Amorim, LC, Rosa, MM da, Barbosa, JI de S., Melo, MRCS de ., Bezerra , R. de S. ., & Silva, MV da . (2021). "Actividades biológicas y perfil químico de *Batis maritima* (Bataceae), una especie halófito con potencial de bioprospección". *Investigación, Sociedad y Desarrollo* , 10 (16), e391101623726. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i16.23726>

Scopel, B. . R., Miranda, PHO de, Silva, RS da ., Alves, JV de O. ., Veras, BO de, Amorim, LC, Rosa, MM da, Barbosa, JI de S., Melo, MRCS de ., Bezerra , R. de S. ., & Silva, MV da . (2021). "Actividades biológicas y perfil químico de *Batis maritima* (Bataceae), una especie halófito con potencial de bioprospección". *Investigación, Sociedad y Desarrollo* , 10 (16), e391101623726. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i16.23726>

Shang, C., Wang, L., Tian, C., & Song, J. (2020). Heavy metal tolerance and potential for remediation of heavy metal-contaminated saline soils for the euhalophyte *Suaeda salsa*. *Plant Signaling & Behavior*, 15(11). <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1805902>

Shang, C., Wang, L., Tian, C., & Song, J. (2020). Heavy metal tolerance and potential for remediation of heavy metal-contaminated saline soils for the euhalophyte *Suaeda salsa*. *Plant Signaling & Behavior*, 15(11). <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1805902>

Sieverding, E. (1983). Manual de métodos para la investigación de la micorriza vesículo arbuscular en el laboratorio. CIAT. [http://ciat-library.ciat.cgiar.org/ciat\\_digital/CIAT/books/historical/198.pdf](http://ciat-library.ciat.cgiar.org/ciat_digital/CIAT/books/historical/198.pdf)

Sieverding, E. (1983). Manual de métodos para la investigación de la micorriza vesículo arbuscular en el laboratorio. CIAT. [http://ciat-library.ciat.cgiar.org/ciat\\_digital/CIAT/books/historical/198.pdf](http://ciat-library.ciat.cgiar.org/ciat_digital/CIAT/books/historical/198.pdf)

Silva, H. D. D., & Montoya, L. V. G. (2022). Hongos micorrizas arbusculares: la simbiosis de los múltiples beneficios. *Revista Ciencia y Tecnología el Higo*, 12(2), 2-14. <https://doi.org/10.5377/elhigo.v12i2.15196>

Silva, H. D. D., & Montoya, L. V. G. (2022). Hongos micorrizas arbusculares: la simbiosis de los múltiples beneficios. *Revista Ciencia y Tecnología el Higo*, 12(2), 2-14. <https://doi.org/10.5377/elhigo.v12i2.15196>

Silva, H. D. D., & Montoya, L. V. G. (2022). Hongos micorrizas arbusculares: la simbiosis de los múltiples beneficios. *Revista Ciencia y Tecnología el Higo*, 12(2), 2-14. <https://doi.org/10.5377/elhigo.v12i2.15196>

Silva, H. D. D., & Montoya, L. V. G. (2022). Hongos micorrizas arbusculares: la simbiosis de los múltiples beneficios. *Revista Ciencia y Tecnología el Higo*, 12(2), 2-14. <https://doi.org/10.5377/elhigo.v12i2.15196>

Singh Kanwar V., Sharma A., Lal Srivastav A. & Rani L. (2020). Phytoremediation of toxic metals present in soil and water environment: a critical review. Springer, 44835–44860. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10713-3>.

Singh Kanwar V., Sharma A., Lal Srivastav A. & Rani L. (2020). Phytoremediation of toxic metals present in soil and water environment: a critical review. Springer, 44835–44860. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10713-3>.

Singh, V. K., Singh, R., Rajput, V. D., & Singh, V. K. (2022). Halophytes for the sustainable remediation of heavy metal-contaminated sites: Recent developments and future perspectives. *Chemosphere*, 313, 137524. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137524>

Singh, V. K., Singh, R., Rajput, V. D., & Singh, V. K. (2022). Halophytes for the sustainable remediation of heavy metal-contaminated sites: Recent developments and future perspectives. *Chemosphere*, 313, 137524. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137524>

Solis-Mendoza, F., Sahagún-Castellanos, J., Villanueva-Verduzco, C., Colinas-León, M. T., & Del Rosario García-Mateos, M. (2012). BIOMASS DISTRIBUTION AND LEAD ACCUMULATION IN SQUASH (*Cucurbita pepo* L.) GROWN IN CONTAMINATED SOIL. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, XVIII(2), 197-205. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2009.12.102>

Solis-Mendoza, F., Sahagún-Castellanos, J., Villanueva-Verduzco, C., Colinas-León, M. T., & Del Rosario García-Mateos, M. (2012). BIOMASS DISTRIBUTION AND LEAD ACCUMULATION IN SQUASH (*Cucurbita pepo* L.) GROWN IN CONTAMINATED SOIL. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, XVIII(2), 197-205. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2009.12.102>

Varela, L. A., & Ron, S. R. (2018). Geografía y clima del Ecuador. BIOWEB. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Disponible en <https://bioweb.bio/geografiaClima.html/> Consulta: 31 de enero 2019

Varela, L. A., & Ron, S. R. (2018). Geografía y clima del Ecuador. BIOWEB. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Disponible en <https://bioweb.bio/geografiaClima.html/> Consulta: 31 de enero 2019

Yang, J., You, S., & Zheng, J. (2019). Review in strengthening technology for phytoremediation of soil contaminated by heavy metals. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 242(5), 052003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/242/5/052003>

Yang, J., You, S., & Zheng, J. (2019). Review in strengthening technology for phytoremediation of soil contaminated by heavy metals. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 242(5), 052003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/242/5/052003>

Yang, R., Qin, Z., Wang, J., Xu, S., Zhao, W., Zhang, X., & Huang, Z. (2020). Salinity changes root occupancy by arbuscular mycorrhizal fungal species. *Pedobiologia*, 81-82, 150665. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2020.150665>

Zalaghi, R., Safari-Sinegani, A., & Aliasgharzad, N. (2020). The Effects of Inoculation with Three *Glomus* Species on Growth and Pb Uptake by Hemp (*Cannabis Sativa*) in a Pb-Contaminated Soil. *Systematic Bioscience And Engineering*, 1-15. <https://doi.org/10.37256/sbe.112021192>

### Anexo de tablas

Tabla 12. *Medición de clorofila en los tratamientos contaminados con Cd.*

Metales pesados	Tratamientos	Concentración	Clorofila
<b>Cd</b>		ppm	
<b>Cd</b>	T1	100	28,2±10.94 <sup>A</sup>
<b>Cd</b>	T2	250	27,62±5.72 <sup>A</sup>
<b>Cd</b>	T3	500	15,63±6.19 <sup>B</sup>

Nota: De acuerdo con la prueba de Tukey ( $p < 0,05$ ), las medias que comparten la misma letra en la misma fila no son significativamente diferentes. Por el contrario, las medias con letras distintas sí lo son. Los datos se expresan como la media  $\pm$  la desviación estándar.

Tabla 13. *medición de clorofila en los tratamientos contaminados con Pb.*

Metales pesados	Tratamientos	Concentración	Clorofila
<b>Pb</b>		ppm	
<b>Pb</b>	T1	100	39,4 $\pm$ 12,43 <sup>A</sup>
<b>Pb</b>	T2	250	36,36 $\pm$ 11,87 <sup>B</sup>
<b>Pb</b>	T3	500	20,76 $\pm$ 10,87 <sup>C</sup>

Nota: De acuerdo con la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis ( $p < 0,05$ ), las medias que comparten la misma letra en la misma fila no son significativamente diferentes. Por el contrario, las medias con letras distintas sí lo son. Los datos se expresan como la media  $\pm$  la desviación estándar.

Tabla 14. *Comparaciones múltiples por sitio mediante test HSD Turkey para Pb.*

Comparaciones múltiples						
Variable dependiente:						
HSD Tukey						
(I) Sitio		Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
<b>General Villamil</b>	Engabao	-82,4444*	24,67285	0,008	-144,4242	-20,4647
	Data de Posorja	6,7778	24,67285	0,959	-55,2020	68,7575

<b>Engabao</b>	General Villamil	82,4444*	24,67285	0,008	20,4647	144,4242
	Data de Posorja	89,2222*	24,67285	0,004	27,2425	151,2020
<b>Data de Posorja</b>	General Villamil	-6,7778	24,67285	0,959	-68,7575	55,2020
	Engabao	-89,2222*	24,67285	0,004	-151,2020	-27,2425

Nota: Se basa en las medias observadas. \* Diferencia de medias significativas.

Tabla 15. Comparaciones múltiples por tipo de muestra mediante test HSD Turkey para Pb.

<b>Comparaciones múltiples</b>						
<b>Variable dependiente:</b>						
<b>HSD Tukey</b>						
<b>(I) Tipo de muestra</b>		Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
<b>Hojas</b>	Raíz	-71,2222*	24,67285	0,022	-133,2020	-9,2425
	Suelo	-306,4444*	24,67285	0,000	-368,4242	-
					244,4647	
<b>Raíz</b>	Hojas	71,2222*	24,67285	0,022	9,2425	133,2020
	Suelo	-235,2222*	24,67285	0,000	-297,2020	-
					173,2425	
<b>Suelo</b>	Hojas	306,4444*	24,67285	0,000	244,4647	368,4242
	Raíz	235,2222*	24,67285	0,000	173,2425	297,2020

Nota: \*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Tabla 16. Comparaciones múltiples por sitio mediante test HSD Turkey para Cd.

<b>Comparaciones múltiples</b>						
<b>Variable dependiente:</b>						
<b>HSD Tukey</b>						
<b>(I) Sitio</b>		Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
<b>General Villamil</b>	Engabao	1,66667	1,47824	0,507	-2,0249	5,3582
	Data de Posorja	-3,33333	1,47824	0,082	-7,0249	0,3582
<b>Engabao</b>	General Villamil	-1,66667	1,47824	0,507	-5,3582	2,0249

	Data de Posorja	-5,00000*	1,47824	0,007	-8,6916	-
<b>Data de Posorja</b>	General Villamil	3,33333	1,47824	0,082	-0,3582	7,0249
	Engabao	5,00000*	1,47824	0,007	1,3084	8,6916

Tabla 17. Comparaciones múltiples por tipo de muestra mediante test HSD Turkey para Cd.

Comparaciones múltiples						
Variable dependiente:						
HSD Tukey						
(I) Tipo de muestra		Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
<b>Hojas</b>	Raíz	-5,44444*	1,21378	0,000	-8,4756	-2,4133
	Suelo	-5,88889*	1,21378	0,000	-8,9200	-2,8577
<b>Raíz</b>	Hojas	5,44444*	1,21378	0,000	2,4133	8,4756
	Suelo	-0,44444	1,21378	0,929	-3,4756	2,5867
<b>Suelo</b>	Hojas	5,88889*	1,21378	0,000	2,8577	8,9200
	Raíz	0,44444	1,21378	0,929	-2,5867	3,4756

Nota: \*Diferencia significativa a partir de 0,05. Se observa diferencia significativa entre Hojas vs Raíz, Suelo vs Hojas.

Tabla 18. Niveles de Pb y Cd en Raíces según Dosis de Tratamiento.

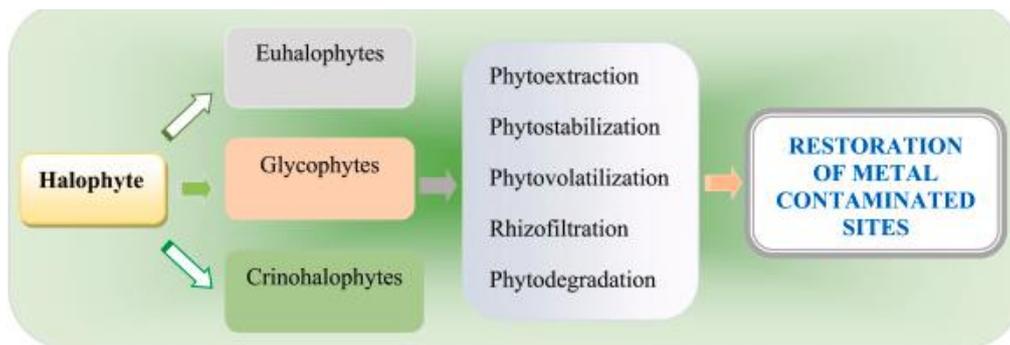
Raíz			
Tratamiento	Pb	Tratamiento	Cd
	Concentración (mg/kg)		Concentración (mg/kg)
<b>T0</b>	1,32	T0	0,11
<b>T1</b>	8,171	T1	402,29
<b>T2</b>	109,97	T2	628,31
<b>T3</b>	22,11	T3	61,87

Fuente: Autores, 2025.

Tabla 19. *Test Tukey para la separación de grupos con presencias de HMA..*

<b>Total</b>			
<b>HSD Tukey<sup>a</sup></b>			
<b>Sitio</b>	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
		1	2
<b>Data de Posorja</b>	9	2,89	
<b>Engabao</b>	9	3,56	
<b>General Villamil</b>	9		9,89
<b>Sig.</b>		,916	1,000

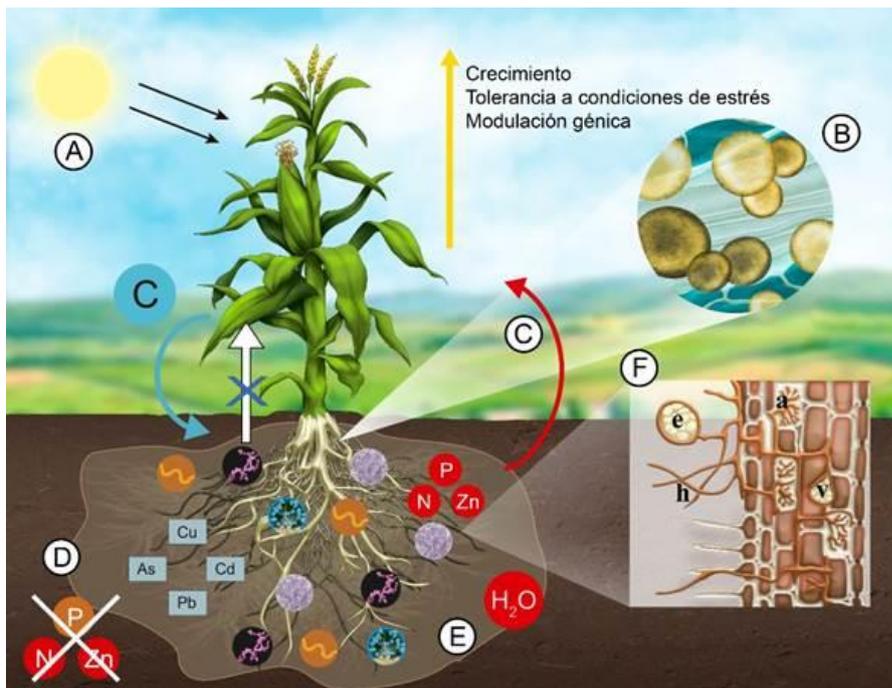
## Anexo de figuras



Anexo 1. *Tipos de halófitas y su papel potencial en la restauración de sitios contaminados con metales.* Fuente: Singh et al. (2022).



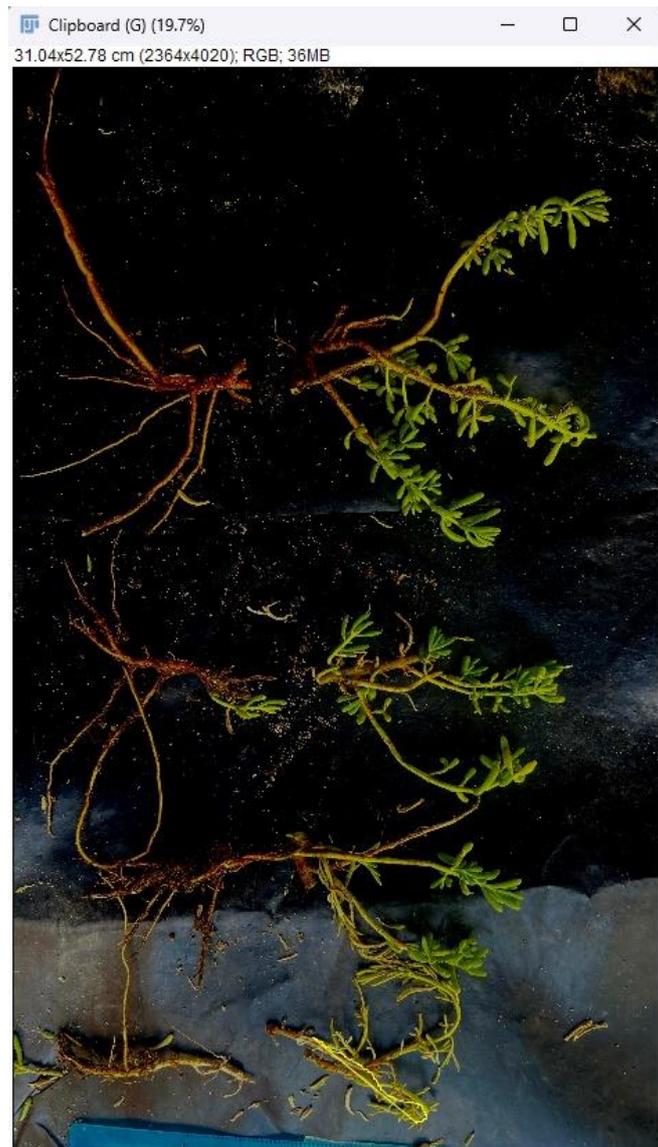
Anexo 2. *Distribución de B. maritima en Ecuador.* Fuente: (POWO, 2023).



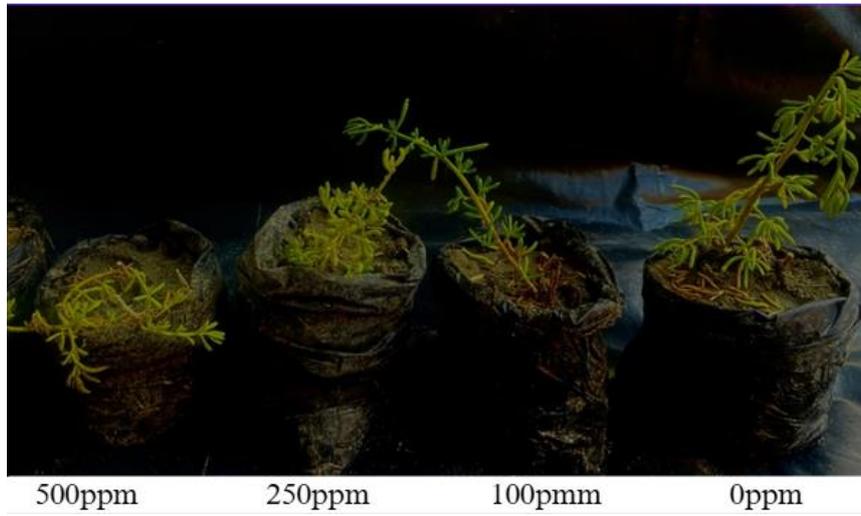
Anexo 3. *Importancia de las micorrizas arbusculares en la nutrición vegetal y su contribución al crecimiento y adaptación de las plantas frente a condiciones adversas.* Fuente: Carrillo-Saucedo et al, 2022.

COD.	NOMBRE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MEDIA
M173	PLAYAS-GRAL. VILLAMIL	25,9	26,3	26,3	26,4	26,2	24,9	24,0	23,1	23,1	23,4	24,0	24,7	24,8
M175	EL PROGRESO	26,2	26,5	26,4	26,6	25,6	24,5	23,7	23,7	24,1	24,3	24,7	25,5	25,2

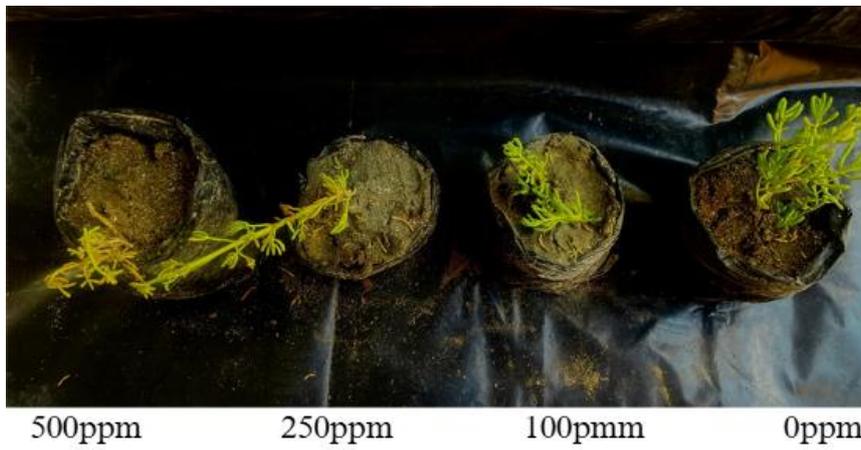
Anexo 4. *Temperatura Media Mensual y Anual (°C).* Fuente: Información Meteorológica del INAMHI. Elaborado: CLIRSEN-MAGAP, 2012.



*Anexo 5. Medición de la planta con ayuda de la aplicación ImageJ.*



Anexo 6. *Tratamientos con plantas contaminadas de Cd.*



Anexo 7. *Tratamientos con plantas contaminadas de Pb.*



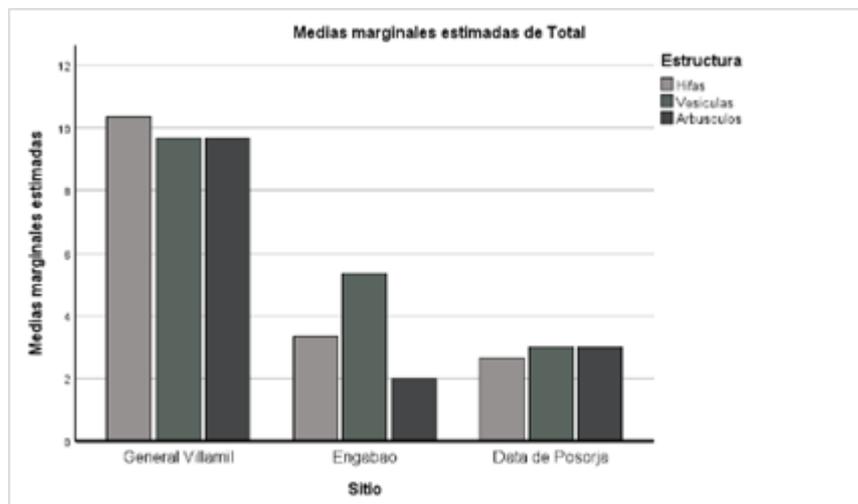
*Anexo 8. Recolección de plantas en playa El pelado – General Villamil Playas*



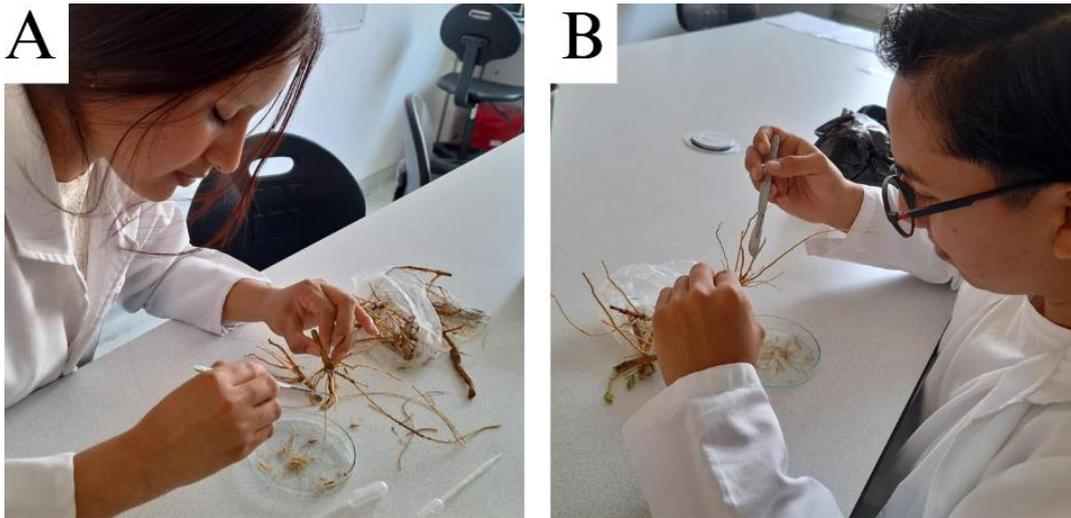
*Anexo 9. Salida de campo en el sector de Engabao.*



Anexo 10. *B. maritima* en playa el Pelado.



Anexo 11. Comparación de presencia de estructuras micorrízicas en las tres zonas



Anexo 12. *Corte de tejido radicular*. A = Daniela Villalta realizando cortes. B =Pablo Zaldivar realizando cortes.



Anexo 13. *Muestras iniciales teñidas en azul de tripano*.



Anexo 14. *Medición manual de B. maritima.*



Anexo 15. *Muestras iniciales listas para ser secadas.* A= Muestras en placas Petri. B= Estufa de secado