



REPÚBLICA DEL ECUADOR

**UNIVERSIDAD ESTATAL DE MILAGRO
FACULTAD DE POSGRADO**

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

**INFORME DE INVESTIGACIÓN
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:**

MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGÍA

TEMA:

BIOMONITOREO DE METALES PESADOS (Cd, As y Pb) EMPLEANDO A
LA ESPECIE *Pseudosamanea guachapele* COMO PROPUESTA DE
BIOINDICADOR EN ZONAS DEL GUAYAS Y EL ORO, ECUADOR

Autor:

Andrea Estefanía León Montero

Director:

MSc. Diego Geovanny Barzallo Granizo

Milagro, 2024

Derechos de Autor

Sr. Dr.

Fabrizio Guevara Viejó

Rector de la Universidad Estatal de Milagro

Presente.

Yo, **Andrea Estefanía León Montero**, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de este informe de investigación, mediante el presente documento, libre y voluntariamente cedo los derechos de Autor de este proyecto de desarrollo, que fue realizada como requisito previo para la obtención de mi Grado, de **Magíster en Biotecnología**, como aporte a la Línea de Investigación Medición y control ambiental de conformidad con el Art. 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, concedo a favor de la Universidad Estatal de Milagro una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Conservo a mi favor todos los derechos de autor sobre la obra, establecidos en la normativa citada.

Así mismo, autorizo a la Universidad Estatal de Milagro para que realice la digitalización y publicación de este Proyecto de Investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

El autor declara que la obra objeto de la presente autorización es original en su forma de expresión y no infringe el derecho de autor de terceros, asumiendo la responsabilidad por cualquier reclamación que pudiera presentarse por esta causa y liberando a la Universidad de toda responsabilidad.

Milagro, 31 de octubre del 2024

Andrea Estefanía León Montero

C.I.: 0940293384

Aprobación del Tutor del Trabajo de Titulación

Yo, **Diego Geovanny Barzallo Granizo**, en mi calidad de tutor del trabajo de titulación, elaborado por **Andrea Estefania León Montero**, cuyo tema es Biomonitorio de metales pesados (Cd, As y Pb) empleando a la especie *Pseudosamanea guachapele* como propuesta de bioindicador en zonas del Guayas y el Oro, Ecuador, que aporta a la Línea de Investigación de Medición y control ambiental, previo a la obtención del Grado **Magíster en Biotecnología**. Trabajo de titulación que consiste en una propuesta innovadora que contiene, como mínimo, una investigación exploratoria y diagnóstica, base conceptual, conclusiones y fuentes de consulta, considero que el mismo reúne los requisitos y méritos necesarios para ser sometido a la evaluación por parte del tribunal calificador que se designe, por lo que lo **APRUEBO**, a fin de que el trabajo sea habilitado para continuar con el proceso de titulación de la alternativa de Informe de Investigación de la Universidad Estatal de Milagro.

Milagro, 31 de octubre del 2023

Diego Geovanny Barzallo Granizo
C.I.: 0603923095

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
FACULTAD DE POSGRADO
CERTIFICACIÓN DE LA DEFENSA

El TRIBUNAL CALIFICADOR previo a la obtención del título de **MAGÍSTER EN BIOTECNOLOGÍA**, presentado por **BIOL. LEÓN MONTERO ANDREA ESTEFANÍA**, otorga al presente proyecto de investigación denominado "BIOMONITOREO DE METALES PESADOS (CD, AS Y PB) EMPLEANDO A LA ESPECIE PSEUDOSAMANEA GUACHAPELE COMO PROPUESTA DE BIOINDICADOR EN ZONAS DEL GUAYAS Y EL ORO, ECUADOR.", las siguientes calificaciones:

| | |
|-----------------|------------------|
| TRABAJO ESCRITO | 56.27 |
| SUSTENTACIÓN | 38.17 |
| PROMEDIO | 94.43 |
| EQUIVALENTE | Muy Bueno |



firmado digitalmente por
**ALEX EDWIN GUILLEN
BONILLA**

**Ing. GUILLEN BONILLA ALEX EDWIN
PRESIDENTE/A DEL TRIBUNAL**



firmado digitalmente por
**ALEXANDRA GABRIELA
VALENZUELA COBOS**

**VALENZUELA COBOS ALEXANDRA GABRIELA
VOCAL**



firmado digitalmente por
**KATHERINE LISSETTE
ROMERO VASQUEZ**

**Mgs ROMERO VASQUEZ KATHERINE LISSETTE
SECRETARIO/A DEL TRIBUNAL**

Dedicatoria

A mis padres, por su amor incondicional, su apoyo constante y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia que deseo dejar de legado a mi hija Camila Morán León, con todo mi amor, un logro más para ti, hija.

A mi hermano Emilio León Montero y mi primo Marvin Fierro Montero por la colaboración y ayuda incondicional. Agradezco a mi familia, por creer en mí y por ser mi fuente de inspiración.

Agradecimientos

Agradezco a Dios y a mi familia, por su infinito amor, paciencia y confianza, a mi hermano y primo por el apoyo y servicio en todo momento.

Gracias por compartir conmigo estos momentos y por ser parte de mi red de apoyo incondicional.

A la Dra. Beatriz Pernía Santos, expreso mi más profundo agradecimiento por su paciencia, comprensión y por acompañarme en cada paso de este camino. Su apoyo y dedicación experta han sido fundamental para la realización de este sueño.

Reconozco y agradezco las aportaciones del MSc. Xavier Cornejo Sotomayor por sus enseñanzas y valiosos aportes brindados para este estudio de investigación.

Un profundo agradecimiento por la colaboración y atención brindada de ANAVANLAB (Analítica avanzada – asesoría y laboratorios) muchas gracias por el profesionalismo que los caracteriza y el trabajo en conjunto desarrollado.

Valoro el trabajo realizado por el MSc. Diego Bazallo, con su guía durante la realización de esta tesis como tutor.

Al Ing. Jhony Ayón administrador del Bosque Protector Cerro Blanco le doy las gracias por la colaboración y contribución brindada.

Resumen

El presente estudio evaluó la acumulación de metales pesados (Cd, As, y Pb) en el suelo y en la especie *Pseudosamanea guachapele* en las provincias de Guayas y el Oro, Ecuador, con el objetivo de determinar la viabilidad de esta especie como bioindicador en el biomonitoreo ambiental. La investigación propone el uso de *Pseudosamanea guachapele*, una planta nativa de Ecuador, como un bioindicador para el monitoreo de metales pesados, dado su potencial para acumular estos elementos en sus tejidos.

Se recolectaron muestras de raíces y suelo en cuatro localidades, las cuales fueron analizadas mediante técnicas de espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP - MS) en el análisis preliminar del estudio y espectrofotometría de absorción atómica de llama (AAS) para la cuantificación específica de los metales en los tejidos de la especie vegetal y suelos de las diferentes localidades. Los resultados indicaron variaciones significativas en las concentraciones de metales pesados entre los sitios de muestreo.

Los análisis estadísticos incluyeron datos que presentan normalidad que han sido tratados mediante el test de ANOVA, que ha revelado diferencias significativas en la concentración de metales pesados en función de la localidad ($F = 55,96$, $p > 0,05$). Por otro lado, los resultados que no mostraron diferencias significativas y normalidad fueron evaluados mediante el test de Kruskal Wallis ($H = 10,38$, $p > 0,05$) que ha permitido destacar diferencias significativas entre las localidades de estudio.

El test de correlación de Spearman mostró una correlación positiva significativa entre las concentraciones de plomo en el suelo y en las raíces de *Pseudosamanea guachapele* ($r = 0,93$), lo que confirma la capacidad de esta especie para reflejar con precisión la contaminación por plomo en el ambiente.

En conclusión, los resultados sugieren que *Pseudosamanea guachapele* es un bioindicador eficaz para la acumulación de metales pesados, especialmente de plomo. El estudio aporta una herramienta valiosa para el biomonitoreo y gestión ambiental en zonas afectadas por actividades industriales y mineras, proponiendo acciones para la mitigación de la contaminación.

Palabras claves: Biomonitoreo, Bioindicador, Acumulación y *Pseudosamanea guachapele*.

Abstract

The present study evaluated the accumulation of heavy metals (Cd, As, and Pb) in soil and in the species *Pseudosamanea guachapele* in the provinces of Guayas and el Oro, Ecuador, with the aim of determining the viability of this species as a bioindicator in environmental biomonitoring. The research proposes the use of *Pseudosamanea guachapele*, a native plant from Ecuador, as a bioindicator for monitoring heavy metals, given its potential to accumulate these elements in its tissues.

Root and soil samples were collected at four locations and analyzed using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) techniques in the preliminary analysis of the study and flame atomic absorption spectrophotometry (AAS) for the specific quantification of metals in plant tissues and soils from the different locations. The results indicated significant variations in heavy metal concentrations between sampling sites.

Statistical analyses included data that were normal and treated using the ANOVA test, which revealed significant differences in the concentration of heavy metals depending on the location ($F = 55,96$, $p > 0,05$). Although the differences were not always significant in all cases, and data that were not normal and were treated using the Kruskal Wallis test ($H = 10,38$, $p > 0,05$) which also highlighted significant differences between the study locations.

The Spearman correlation test showed a significant positive correlation between the concentrations of lead in the soil and in the roots of *Pseudosamanea guachapele* ($r = 0,93$), which confirms the capacity of this species to accurately reflect lead contamination in the environment.

In conclusion, the results suggest that *Pseudosamanea guachapele* is an effective bioindicator for the accumulation of heavy metals, especially lead. The study provides a valuable tool for biomonitoring and environmental management in areas affected by industrial and mining activities, proposing actions to mitigate pollution.

Keywords: Biomonitoring, Bioindicator, Accumulation and *Pseudosamanea guachapele*.

Lista de Figuras

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 Ventajas de los organismos bioindicadores..... | 15 |
| Figura 2 Fuentes de exposición al Pb..... | 18 |
| Figura 3 Representación de las hojas y floración de la especie <i>P. guachapele</i> | 20 |
| Figura 4 Estrategias de fitorremediación..... | 24 |
| Figura 5 Tratamiento de las muestras sólidas para su respectivo análisis..... | 29 |
| Figura 6 Tratamiento de las muestras en solución por absorción atómica de llama. | 36 |
| Figura 7 Tratamiento de las muestras en solución por generación de hidruros..... | 37 |
| Figura 8 Factor de bioconcentración de los metales pesados en las especies vegetales con la técnica de ICP-MS..... | 42 |
| Figura 9 Test de Dunn's post hoc de As en los diferentes sitios de muestreo para <i>P. guachapele</i> | 44 |
| Figura 10 Concentración de As en <i>P. guachapele</i> (mg/kg) según las localidades de estudio..... | 45 |
| Figura 11 Test de Dunn's en As para los diferentes sitios de muestreo para el suelo. | 46 |
| Figura 12 Concentración de As en el suelo (mg/kg) según las localidades de estudio. | 47 |
| Figura 13 Test de Tukey's del Cd presente en los diferentes sitios de muestreo para <i>P. guachapele</i> | 48 |
| Figura 14 Concentración de Cd en <i>P. guachapele</i> (mg/kg) según las localidades de estudio..... | 49 |
| Figura 15 Test de Tukey's del Cd presente en los diferentes sitios de muestreo para el suelo..... | 50 |
| Figura 16 Concentración de Cd en el suelo (mg/kg) según las localidades de estudio. | 51 |
| Figura 17 Test de Dunn's de Pb en los diferentes sitios de muestreo en <i>P. guachapele</i> | 52 |
| Figura 18 Concentración de Pb en <i>P. guachapele</i> (mg/kg) según las localidades de estudio..... | 53 |
| Figura 19 Test de Tukey's del Pb presente en los diferentes sitios de muestreo para el suelo..... | 54 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 20 Concentración de Pb en el suelo (mg/kg) según las localidades de estudio. | 55 |
| Figura 21 Correlación de los metales pesados en las muestras de P. guachapele y el suelo..... | 56 |

Lista de Tablas

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1 Variables de investigación dependientes e independientes..... | 8 |
| Tabla 2 Clasificación taxonómica del ejemplar arbóreo Guachapelí. | 19 |
| Tabla 3 Listado de los sitios RAMSAR del Ecuador..... | 21 |
| Tabla 4 Procedimiento metodológico empleado para el análisis de metales mediante la técnica de ICP - MS en las muestras vegetales y de sedimento..... | 30 |
| Tabla 5 Metodología analítica - lista de los metales disponibles para el análisis de ICP - MS en muestras vegetales y de sedimento | 31 |
| Tabla 6 Metodología analítica empleada para el análisis de cadmio y plomo mediante la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica de Llama en las muestras vegetales y de suelo..... | 35 |
| Tabla 7 Metodología analítica empleada para el análisis del arsénico mediante la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS) y generación de hidruros en las muestras vegetales y de suelo..... | 35 |
| Tabla 8 Análisis de las muestras en suelo y las especies vegetales representativas de Portovelo (Puente negro - Río amarillo) mediante la técnica ICP-MS | 40 |
| Tabla 9 Análisis de las muestras en suelo y P. guachapele mediante la técnica EAA Llama..... | 43 |

Índice / Sumario

| | |
|--------------------------------------------------------------|----------|
| Derechos de Autor | ii |
| Aprobación del Tutor del Trabajo de Titulación | iii |
| Certificación de Defensa | iv |
| Dedicatoria..... | v |
| Agradecimientos..... | vi |
| Resumen..... | vii |
| Lista de Figuras | viii |
| Lista de Tablas | viii |
| Índice / Sumario..... | x |
| Introducción | 1 |
| CAPÍTULO I: El Problema de la Investigación..... | 4 |
| 1.1. Planteamiento del problema..... | 4 |
| 1.2. Delimitación del problema | 5 |
| 1.3. Formulación del problema..... | 5 |
| 1.4. Preguntas de investigación | 5 |
| 1.5. Objetivos | 6 |
| 1.5.1 Objetivo general..... | 6 |
| 1.5.2 Objetivos específicos | 6 |
| 1.6. Hipótesis | 6 |
| 1.7. Justificación..... | 7 |
| 1.7.1. Alcances y limitaciones..... | 7 |
| 1.8. Declaración de las variables (Operacionalización) | 8 |
| CAPÍTULO II: Marco Teórico Referencial..... | 9 |
| 2.1. Antecedentes Referenciales..... | 9 |
| 2.2. Marco Conceptual | 14 |
| 2.2.1 Biomonitoreo..... | 14 |
| 2.2.2 Bioindicador | 14 |
| 2.2.3 Bioacumulación..... | 15 |
| 2.2.4 Metales pesados | 16 |
| 2.2.5 Cadmio (Cd) | 16 |
| 2.2.6 Arsénico (As)..... | 17 |
| 2.2.7 Plomo (Pb)..... | 17 |

| | | |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.8 | <i>Pseudosamanea guachapele</i> | 19 |
| 2.2.9 | Humedales | 20 |
| 2.2.10 | Minería..... | 23 |
| 2.2.11 | Fitorremediación..... | 23 |
| 2.3. | Marco Teórico | 25 |
| CAPÍTULO III: Diseño Metodológico..... | | 26 |
| 3.1. | Tipo y diseño de investigación | 26 |
| 3.2. | La población y la muestra | 27 |
| 3.3. | Los métodos y las técnicas..... | 28 |
| 3.3.1 | Metodología analítica en muestras sólidas..... | 28 |
| 3.3.2 | Digestión por microonda..... | 28 |
| 3.3.3 | Espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP – MS) | 30 |
| 3.3.4 | Absorción atómica de llama..... | 34 |
| 3.3.5 | Generación de hidruros | 37 |
| 3.4. | Procesamiento estadístico de la información | 39 |
| CAPÍTULO IV: Análisis e Interpretación de Resultados | | 40 |
| 4.1. | Análisis e Interpretación de Resultados | 40 |
| 4.1.1 | Composición de los metales en el suelo y especies vegetales (Portovelo) mediante la técnica ICP-MS..... | 40 |
| 4.1.2 | Concentraciones de As, Cd y Pb en <i>P. guachapele</i> y suelo mediante la técnica EAA – Llama | 43 |
| 4.1.2.1 | Análisis estadístico del arsénico (As) en <i>P. guachapele</i> y el suelo. | 44 |
| 4.1.2.2 | Análisis estadístico del cadmio (Cd) en <i>P. guachapele</i> y el suelo. | 48 |
| 4.1.2.3 | Análisis estadístico del plomo (Pb) en <i>P. guachapele</i> y el suelo..... | 52 |
| 4.1.3 | Correlación entre las concentraciones de Cd, As y Pb en <i>P. guachapele</i> y el suelo | 56 |
| CAPÍTULO V: Conclusiones, Discusión y Recomendaciones | | 58 |
| 5.1. | Discusión..... | 58 |
| 5.2. | Conclusiones..... | 60 |
| 5.3. | Recomendaciones..... | 62 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | | 64 |
| ANEXOS | | 72 |

Introducción

El continuo desarrollo de los sistemas urbanos e industriales ha generado como resultado varios impactos ambientales (Rodríguez et al., 2017), tales como la creciente emisión al ambiente de sustancias contaminantes y la liberación de metales pesados provenientes de diversas industrias. El suelo, el agua y el aire se han deteriorado significativamente debido a la presencia de sustancias tóxicas que no solo provienen de fenómenos naturales, sino también de actividades humanas como la agricultura, la minería y la industria, las cuales generan cada vez más residuos, agravando la crisis climática y ambiental global (Jiménez, 2017).

Las actividades industriales y mineras son consideradas las principales causantes de la contaminación por metales pesados en el medio ambiente, lo que provoca una toxicidad significativa debido al plomo (Pb), mercurio (Hg), cadmio (Cd), arsénico (As) y cromo (Cr), que son los más comunes. Además, se suman a esto las emisiones de combustibles fósiles, siendo el principal problema la quema de gasolina con plomo, que es el material (Aguilar, 2019).

En Ecuador, las actividades industriales abarcan desde la refinación de petróleo hasta la extracción de minerales y la agroindustria, las cuales emplean diariamente diversas sustancias y metales pesados que ponen en peligro el medio ambiente. La transformación de materias primas e insumos en estos procesos industriales produce residuos con variadas características físicas, los cuales se convierten en subproductos del proceso de producción (Ministerio del Ambiente, 2020).

En consecuencia, el sector minero e industrial del Ecuador en las provincias del Guayas y el Oro, ha incrementado en los últimos años, generando una creciente preocupación por el impacto ambiental de los metales pesados, incluidos el Cd, As y Pb (Calero, 2023). La acumulación de estos elementos tóxicos en los suelos, el agua y los seres vivos puede generar riesgos importantes para la biodiversidad y las poblaciones humanas, debido a la persistencia que mantienen en el medio ambiente y la capacidad de bioacumulación en los organismos vivos (Sáenz et al., 2023).

De los metales pesados, el Cd y el Pb son de los más tóxicos. La exposición a Cd se ha asociado a enfermedades renales, hipertensión, anemia, diabetes y algunos tipos de cáncer como: leucemia, cáncer de mama y próstata (Pernía et al., 2018). Asimismo, el Pb genera alteraciones en el estatus iónico celular y estrés oxidativo, lo que trae como

consecuencia de alteraciones endócrinas, inhibición de la actividad enzimática, muerte celular, genotoxicidad y problemas inflamatorios (Lassiter et al., 2015).

Asimismo, la Organización Mundial de la Salud da a conocer que, la exposición prolongada al As a través del agua de bebida y los alimentos puede causar intoxicación crónica. Los efectos más característicos son la aparición de lesiones cutáneas y cáncer de piel (OMS, 2022).

Por consiguiente, se ha considerado al biomonitoreo como una técnica significativa para evaluar la extensión y abundancia de estos contaminantes, proporcionando una evaluación confiable y económica, que permite aprovechar el uso de múltiples especies como bioindicadores para monitorear metales pesados en el medio ambiente, ofreciendo conocimientos valiosos para la evaluación ambiental, la salvaguarda de la salud pública y el avance de estrategias de remediación y biorremediación (Moreno et al., 2021).

Este trabajo de investigación propone a la especie vegetal *Pseudosamanea guachapele*, leguminosa de América tropical, como organismo acumulador, elogiado por su capacidad para almacenar metales pesados en sus tejidos. Cabe destacar que el biomonitoreo vegetal impulsa la búsqueda de plantas hiperacumuladoras con potencial para biorremediación, el desarrollo de biosensores para la detección rápida de metales pesados y la aplicación de ingeniería genética para modificar plantas y mejorar su capacidad de bioindicador (Labre et al., 2022).

De tal manera, el objetivo primordial de la presente investigación es evaluar la presencia y concentración de metales pesados (Cd, As y Pb) empleando a la especie *Pseudosamanea guachapele* como bioindicador en las provincias de Guayas y el Oro, Ecuador. Las muestras correspondientes a la especie vegetal de estudio han sido escogidas al azar en las ciudades de Guayaquil (Guayas – Bosque protector “Cerro Blanco”), Santa Rosa (el Oro – cercanías del humedal “La tembladera”) y Portovelo (el Oro – alrededores del “Puente negro”).

Con la finalidad de lograr los objetivos propuestos, se realizará la metodología descrita por Tucker (2003) y modificada hasta obtener los resultados esperados, mismos que serán evaluados según el acuerdo ministerial 097A (Ministerio del Ambiente, 2015).

El presente estudio se organizó en cinco capítulos, los cuales abordan aspectos específicos de la investigación. A continuación, se manifiesta una breve descripción de la estructura:

En el Capítulo I. se detalla el problema de la investigación con apoyo de datos bibliográficos, se exploran los objetivos y el alcance del estudio, y se plantean la hipótesis, justificación y relevancia de la investigación en el contexto actual.

Capítulo II. Se presenta el marco teórico de referencia, proporcionando las teorías y conceptos esenciales relacionados con el “Biomonitoreo de metales pesados (Cd, As y Pb) en la especie *Pseudosamanea guachapele* en las provincias del Guayas y el Oro”, ofreciendo una base conceptual para el estudio y enfocándose en los fundamentos necesarios para el biomonitoreo de estos metales en la planta objeto de investigación.

Capítulo III. Se describe la metodología empleada en la investigación, incluyendo los métodos, materiales y diseño experimental, así como las variables y su interacción. También se detalla el procesamiento estadístico de los datos recolectados.

Capítulo IV. Se dan a conocer los resultados obtenidos en la investigación, con el análisis detallado e interpretación de los datos alcanzados. Se discuten estos resultados en relación con la bibliografía existente sobre los biomonitoreos en las especies vegetales.

Capítulo V. Se exponen los resultados de manera específica, se sintetizan las conclusiones derivadas de la investigación y ofrecen recomendaciones para futuros estudios o aplicaciones prácticas basadas en los datos obtenidos.

En definitiva, esta investigación busca generar una herramienta invaluable para la biotecnología, aportando en la investigación de más especies vegetales nativas como bioindicadores contribuyendo a un ambiente sano y sostenible. Un análisis más exhaustivo sobre la problemática y los resultados se presentarán en capítulos posteriores.

CAPÍTULO I: El Problema de la Investigación

1.1. Planteamiento del problema

La contaminación por metales pesados representa una preocupación integral importante. Varios estudios han documentado los efectos negativos de la contaminación por metales pesados en los suelos agrícolas, ecosistemas y en la salud humana, tales como erupciones cutáneas, úlceras, problemas respiratorios, debilitamiento del sistema inmune y afecciones cardíacas, además de los ecosistemas, integrando ampliamente al medio ambiente (Urbina et al., 2023).

Urbina et al. (2023) consideran que, de la problemática antes descrita, el mayor inconveniente recae en la contaminación de los suelos y su repercusión en los productos vegetales de consumo humano. Sin embargo, Pedroso Herrera (2019) manifiesta que los principales factores que afectan a los ecosistemas por contaminación de metales pesados, se destacan de forma mayoritaria las operaciones de tipo minero, de fundición, entre otras actividades de tipo industrial y urbana.

Por consiguiente, en Ecuador, específicamente en las provincias de Guayas y el Oro, las actividades industriales y agrícolas han aumentado los niveles de metales pesados como el cadmio (Cd), el arsénico (As) y el plomo (Pb) en el ambiente. Estos metales pesados pueden acumularse en los seres vivos, lo que afecta la biodiversidad y la calidad de vida de las comunidades locales.

No obstante, la escasez de estudios de biomonitoreo y la ausencia de bioindicadores específicos para estas regiones dificultan la evaluación precisa de la contaminación y la implementación de medidas correctivas. Por tal motivo, para poder evaluar de manera más precisa el grado de contaminación y tomar medidas correctivas, es necesario contar con herramientas de monitoreo eficientes.

De tal manera, el presente estudio propone el uso de la especie vegetal *Pseudosamanea guachapele* como bioindicador para detectar la presencia de Cd, As y Pb en la naturaleza. Esta especie, al actuar como un sensor biológico, puede proporcionar información valiosa sobre la distribución y concentración de estos metales en el ambiente para tomar decisiones necesarias en el restablecimiento y recuperación del medio ambiente.

1.2. Delimitación del problema

Este estudio se enfocará en:

Las provincias de Guayas y el Oro en Ecuador, áreas conocidas por su actividad agrícola e industrial, focalizándose en las ciudades de Guayaquil (Guayas), Sta. Rosa y Portovelo (el Oro), escogidas al azar por la presencia de la especie *Pseudosamanea guachapele* y accesibilidad a las zonas de muestreo.

La especie *Pseudosamanea guachapele*, ha sido sugerida por su capacidad potencial para acumular metales pesados ante los estudios realizados en un diagnóstico preliminar en el que fueron evaluados diversos metales mediante la técnica del “Plasma de Acoplamiento Inductivo” (ICP) en las raíces.

El presente estudio propone a la especie *Pseudosamanea guachapele* como bioindicador de los metales pesados (Cd), (As) y (Pb) que han sido seleccionados, debido a su prevalencia y toxicidad en estas regiones. El análisis de los metales pesados se realizará en muestras del suelo y en las raíces de la especie vegetal mediante la técnica de “Espectroscopía de Absorción Atómica” (AAS) en diferentes unidades de trabajo, según el tipo de muestra y metal.

Por consiguiente, este trabajo de investigación tiene el potencial de generar un impacto significativo en la gestión ambiental y la salud pública en las provincias de Guayas y el Oro, contribuyendo de esta manera con el desarrollo sostenible de la región ante las prácticas agrícolas y mineras de las zonas expuestas.

1.3. Formulación del problema

¿Cómo afecta la presencia de metales pesados (Cd, As y Pb) al medio ambiente y a la salud pública en las zonas del Guayas y el Oro, Ecuador? ¿Y cómo puede la especie vegetal *Pseudosamanea guachapele* ser propuesta como un bioindicador efectivo para el biomonitoreo de estos contaminantes?

1.4. Preguntas de investigación

- ¿Cuál es la concentración de Cd, As y Pb en el suelo y en los tejidos de la raíz de la especie *Pseudosamanea guachapele* en las provincias de Guayas y el Oro?
- ¿Cómo varía la acumulación de estos metales pesados en *Pseudosamanea guachapele* entre los diferentes sitios de muestreo correspondientes a las localidades estudiadas?

- ¿Qué relación existe entre la concentración de metales pesados en las raíces de *Pseudosamanea guachapele* y los resultados obtenidos en la concentración de los metales pesados en el suelo de las áreas sujetas a la investigación?

1.5. Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Evaluar la presencia y concentración de metales pesados (Cd, As y Pb) empleando a la especie *Pseudosamanea guachapele* como propuesta de bioindicador en zonas del Guayas y el Oro, Ecuador.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Identificar la composición de los metales presentes en el suelo y especies vegetales de el Oro (Portovelo – Río Amarillo) mediante la técnica de espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP – MS) para reconocer la capacidad de bioconcentración de estos metales en las especies.
2. Cuantificar las concentraciones promedio de Cd, As y Pb en suelos y raíces (*Pseudosamanea guachapele*) recolectados en las localidades seleccionadas (Guayas y el Oro) mediante la técnica de espectroscopía de absorción atómica de Llama (EAA Llama)
3. Correlacionar las concentraciones de Cd, As y Pb en las raíces de la especie vegetal *Pseudosamanea guachapele* con las concentraciones en el suelo para analizar y validar su capacidad biomonitora.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis alternativa (H_a): La especie vegetal *Pseudosamanea guachapele* puede acumular metales pesados (Cd, As y Pb) en los tejidos de las raíces en diferentes niveles que reflejen la contaminación ambiental en las provincias de Guayas y el Oro, Ecuador.

1.6.2. Hipótesis nula (H_0): La especie vegetal *Pseudosamanea guachapele* no acumula metales pesados (Cd, As y Pb) en los tejidos de las raíces en diferentes niveles que reflejen la contaminación ambiental en las provincias de Guayas y el Oro, Ecuador.

1.7. Justificación

Martínez et al. (2024) mencionan que el estudio sobre los sistemas de monitoreo para cuantificar los depósitos de los metales pesados en los ecosistemas es escaso, por lo que el biomonitoreo puede ser una alternativa, donde se buscan variables fisiológicas de organismos que respondan a la disponibilidad y alta tolerancia de metales pesados. En concordancia con lo antes expuesto, Martínez et al. (2024) manifiestan que con frecuencia se usan como biomonitores organismos epífitos (son aquellos que viven sobre la superficie de otros organismos, principalmente plantas, sin causarles daño significativo).

Por tal motivo, el presente estudio, propone utilizar a *Pseudosamanea guachapele* como bioindicador con la finalidad de proporcionar una herramienta efectiva y económica para la vigilancia ambiental, facilitando la identificación de áreas contaminadas y apoyando la formulación de políticas de gestión ambiental. Este estudio contribuirá al conocimiento científico y ofrecerá una base para futuras investigaciones y acciones de mitigación en Ecuador y otras regiones con problemas similares.

1.7.1. Alcances y limitaciones

- Proveer datos sobre la concentración de Cd, As y Pb en el suelo y en la especie vegetal *Pseudosamanea guachapele* en las provincias de Guayas y el Oro.
- Evaluar la eficacia de *Pseudosamanea guachapele* como bioindicador de la contaminación por metales pesados.
- Ofrecer recomendaciones para la gestión ambiental y la mitigación de la contaminación por metales pesados.

Limitaciones:

- La disponibilidad y accesibilidad de sitios de muestreo representativos en las provincias de Guayas y el Oro.
- Posibles variaciones en la capacidad de acumulación de metales pesados entre diferentes individuos de *Pseudosamanea guachapele*.

1.8. Declaración de las variables (Operacionalización)

Tabla 1

Variables de investigación dependientes e independientes.

| Variables de investigación | Descripción |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variable de control | Concentración de los metales pesados (Cd, As, Pb) en el suelo y en la especie <i>Pseudosamanea guachapele</i> (raíces) para los análisis mediante la espectroscopía de absorción atómica. |
| Variables dependientes | Concentración de metales pesados (Cd, As y Pb) en los tejidos de las raíces de la especie <i>Pseudosamanea guachapele</i> de los diferentes sitios de muestreo. |
| Variables independientes | Niveles de contaminación por metales pesados (Cd, As y Pb) en el suelo de las localidades del Guayas y el Oro. |

Nota. Esta tabla muestra las variables dependientes e independientes del estudio de investigación. Fuente: León (2024).

CAPÍTULO II: Marco Teórico Referencial

2.1. Antecedentes Referenciales

La contaminación ambiental por metales pesados como el Cd, As y Pb se ha convertido en uno de los problemas ambientales más graves en la actualidad, ya que representa un grave problema ecológico y de salud pública a nivel global. Estos metales, debido a su naturaleza no biodegradable y su capacidad de bioacumulación, pueden persistir en el ambiente y afectar a diversas formas de vida, incluyendo a los seres humanos (Castillo, 2021).

En Ecuador, se han informado niveles alarmantes de estos contaminantes en el suelo y el agua, particularmente en aquellas zonas involucradas en actividades mineras artesanales e ilegales y actividades agrícolas intensivas este tipo de contaminación ha provocado concentraciones de metales en los suelos que exceden los límites normativos, causando graves impactos ambientales (Oviedo et al., 2017).

El estudio realizado por Oviedo et al. (2017) menciona que la minería artesanal en la cuenca del río Puyango, específicamente en Zaruma y Portovelo, provincia de el Oro, se enfoca en la extracción de oro y plata en dos fases: la extracción de mineral en bruto y su posterior procesamiento en plantas ubicadas cerca de los ríos Calera y Amarillo. Estas plantas utilizan cianuro en el proceso de lixiviación, generando relaves que contaminan los ríos con metales pesados.

Según González et al. (2018) los metales considerados más tóxicos y de riesgo para el ambiente son el Cd, mercurio (Hg) y Pb, algunos de ellos provenientes de las minas. De conformidad con lo expuesto, Castro (2019) manifiesta que el minero va al río a lavar el oro encontrado, y en el agua deja residuos de Pb, Hg, manganeso (Mn) y As, dejándolo completamente contaminado y por lo tanto su agua no es apta para el consumo humano. De tal manera, el presente estudio de investigación se encuentra enfocado en tres de los metales pesados anteriormente expuestos, por la importancia representativa en la salud humana y del medio ambiente, siendo estos el Cd, As y el Pb, obtenidos de datos preliminares en el sedimento y la especie vegetal propuesta en el actual trabajo para el biomonitoreo de estos metales contaminantes en Portovelo – el Oro.

Conforme a lo expuesto, estudios como el de Chambi et al. (2017) hacen énfasis en que la minería produce una contaminación de impacto relevante por metales pesados en agua y suelo a través de los desechos sólidos y líquidos que se vierten y que luego son utilizadas

para actividades agropecuarias que generalmente revelan altas concentraciones de metales como As, Cd y Pb. Asimismo, se citan los metales pesados escogidos en la presente investigación como contaminantes de importancia integral.

Según Prieto et al. (2019) por el carácter no biodegradable del Cd ejerce una toxicidad mayor sobre los diferentes cultivos y su biodisponibilidad puede resultar peligrosa. Por consiguiente, la European Commission (2020) manifiesta que el Cd puede contaminar el suelo y el agua, y puede ser absorbido por las plantas y los cultivos provocando en las hojas un marchitamiento y disminución en la longitud de sus raíces y de la biomasa.

Según una nueva declaración científica de la American Heart Association publicada en Journal of the American Heart Association (2023) expone que el cadmio (Cd) provoca en la salud humana una serie de enfermedades cardiovasculares, incluidas entre ellas la enfermedad de las arterias coronarias, ataque cerebral y enfermedad arterial periférica. Asimismo, con relación al efecto del As en las plantas, la Water Quality Association (2024) en el artículo "Arsenic fact sheet" manifiesta que este metal provoca en la vegetación un grado importante de toxicidad que afecta al crecimiento y desarrollo, principalmente al interferir con la absorción de nutrientes esenciales como el fósforo. Este metal se acumula en las raíces y hojas, lo que puede llevar a una reducción en la fotosíntesis y al deterioro general de la salud de la planta. La toxicidad del arsénico puede causar clorosis, necrosis y, en casos graves, la muerte de la planta.

Igualmente, con respecto a la salud humana la importancia de estos metales, implica en el metaloide arsénico su reconocido carcinógeno que provoca enfermedades respiratorias menciona Rodríguez (2019) cardiovasculares y metabólicas (Speer et al., 2023). Según Ramsey (2023) con relación a su toxicidad, es el único que, después de ser ingerido, se asocia con enfermedades respiratorias. En efecto, Flora (2023) coincide con lo antes expuesto, indicando que, en la actualidad el arsénico sigue representando un riesgo para la salud humana a nivel global, ya que contamina las aguas subterráneas y los suministros de alimentos.

Así también, existen estudios que indican la dificultad que implica el incremento del Pb en el suelo y la vegetación, como parte agrícola, lo cual afecta en el desarrollo de las raíces, tallos, hojas, flores y retraso del crecimiento (Collin et al., 2022; Niu et al., 2023) y en los seres humanos tienen efectos letales sobre las células, principalmente como resultado de su capacidad para alterar o desnaturalizar las proteínas (Qu et al., 2020). El plomo

representa graves consecuencias en diferentes órganos y en el cerebro afecta el desarrollo y capacidad mental de los niños (Londoño et al., 2016).

Así pues, la contaminación por metales pesados en el suelo puede afectar su fertilidad, reducir los rendimientos y causar daños químicos que influyen en el metabolismo de las plantas, lo cual también afecta a la red alimentaria, ya que los metales pesados tienen a transferirse a las plantas mediante la vascularización y luego son consumidas por los animales, continuado así la cadena alimenticia, lo que convierte a la agricultura y la ganadería en una fuente potencial de una posible transmisión de enfermedades para los seres humanos.

Por otro lado, Bersosa & Ulloa (2018) dan a conocer que el Ecuador es rico en biodiversidad y cuenta con muchos ecosistemas de agua dulce, como humedales, la mayoría de los cuales están amenazados por las actividades humanas para acceder a los recursos naturales, especialmente la extracción de petróleo, la minería, la silvicultura y el aumento de áreas agrícolas y ganaderas.

Por consiguiente, en una reiterada ocasión, la provincia de el Oro es mencionada en la investigación realizada por Romero, Campuzano & Rueda (2017) con respecto al conocimiento del humedal “La Tembladera”, uno de los sitios de estudio del presente trabajo, en el cual manifiestan que pertenece a uno de los lugares de importancia basado en el tratado internacional Ramsar, relativo a la conservación y uso racional de los humedales.

Reyes (2020) comparte en su investigación que este ecosistema se ve afectado por el impacto ambiental de las prácticas productivas, como la pérdida de vegetación por el cultivo de banano y el uso inadecuado de fertilizantes químicos. Además, la presencia de ganado en los humedales provoca la acumulación de materia orgánica en el nivel freático, aumentando la degradación de los cuerpos de agua con el tiempo y el posible aumento de la contaminación por metales con el tiempo.

En concordancia, Valdivia (2019) cita en su estudio la contaminación de los recursos hídricos de los humedales es muy común y se puede dividir en dos tipos de efectos, uno es el efecto difuso causado por fertilizantes químicos o depósitos metálicos como los sedimentos con metales, el otro es el efecto puntual causado por infiltración directa y también está el efecto puntual.

En este contexto, Waclawek et al. (2022) mencionan que el biomonitoreo se ha establecido como una herramienta eficaz para evaluar la presencia y concentración de metales

pesados en el ambiente. Este método, que involucra el uso de organismos vivos como indicadores biológicos de la contaminación ambiental, lo cual permite una evaluación más precisa y continua de la calidad ambiental. A nivel internacional, diversas especies vegetales han sido utilizadas con éxito como bioindicadores de metales pesados debido a su capacidad para absorber y acumular estos elementos en sus tejidos.

De tal manera, se considera al biomonitoreo como herramienta empleada en la evaluación del nivel de contaminación de ecosistemas seleccionados, así como el impacto de las fuentes individuales de contaminación para un posterior análisis de trazas de elementos, con la finalidad de proporcionar información sobre la concentración y el origen de los contaminantes y cómo se dispersan.

Estudios previos como el de Galvis (2021) menciona que, particularmente en Ecuador la especie *Pseudosamanea guachapele*, un árbol nativo de la región tropical, ha mostrado un gran potencial como bioindicador de contaminación por metales pesados. Su capacidad para sobrevivir en condiciones adversas y su distribución en áreas afectadas por actividades humanas lo posicionan como un candidato ideal para el biomonitoreo ya que puede acumular Cd, As, y Pb en sus raíces, lo que la convierte en un recurso valioso para la evaluación y control de la contaminación en las provincias de Guayas y el Oro.

En concordancia, estudios como el de Akintola et al. (2022) mencionan que la especie *Pseudosamanea* (antiguamente *Albizia*) se ha identificado como una planta prometedora para la fitorremediación de suelos contaminados, como los presentes en los vertederos de residuos. La capacidad de esta planta para absorber y acumular metales pesados como el Cd, el Pb y el As la hace una opción viable para la restauración ambiental, concluyendo con que esta planta no solo contribuye a la descontaminación del suelo, sino que también mejora las condiciones edáficas, promoviendo la recuperación del ecosistema afectado.

A continuación, en un estudio de investigación realizado por Ayodele & Oluseye (2022) en una especie de planta leguminosa (*Albizia procera*), en la rehabilitación de suelos contaminados con petróleo crudo. Se realizaron experimentos en un entorno controlado y se evaluaron variables como el porcentaje de germinación, la altura y grosor de las plantas, el número de hojas y la nodulación, destacando la capacidad de la especie para sobrevivir a diferentes niveles de contaminación, sugiriendo que es una especie leguminosa con potencial para la remediación y rehabilitación de suelos contaminados con petróleo crudo en la región del Delta del Níger.

De tal manera, los trabajos de investigación antes expuestos, resaltan la importancia biológica de la especie *Pseudosamanea* (anteriormente nombrada *Albizia*) como especie biomonitora en la mitigación de suelos contaminados por metales pesados al poseer un sistema radicular extenso y una biomasa significativa, lo que le permite no solo extraer contaminantes del suelo, sino también estabilizarlos y reducir su movilidad, minimizando así el riesgo de contaminación secundaria.

Por consiguiente, proponen que la implementación de *Pseudosamanea* en proyectos de fitorremediación puede ser una herramienta clave en la gestión de residuos y la rehabilitación de áreas contaminadas, especialmente en regiones donde la contaminación por metales pesados es un problema crítico.

2.2. Marco Conceptual

2.2.1 Biomonitorio

El biomonitorio es la técnica más actual en Química ambiental, donde se utilizan organismos, plantas, animales como biomonitores o bioindicadores para lograr evaluar el estado de una determinada zona geográfica y su entorno en función de un contaminante o de un determinado grupo de ellos (Cedrón & Velásquez, 2022).

Kularatne & De Freitas (2013) dan a conocer que los estudios de biomonitorio generalmente se realizan dos formas: biomonitorio pasivo y activo. Siendo el biomonitorio pasivo aquel que se realiza en el área de estudio y recolecta muestras como: plantas, organismos, animales, etc., como parte del biomonitorio para ser trasladada a un laboratorio, donde se detectará un contaminante. Por otro lado, el biomonitorio activo consiste en primer lugar recolectar muestras de un determinado biomonitorio en zonas no contaminadas, para el posterior trasplante a diferentes zonas de estudio (generalmente zonas contaminadas) de forma que dichas muestras acumulen contaminantes en su estructura expuesta durante un determinado tiempo.

Mediante este tipo de monitoreo se puede detectar las causas de degradación de la calidad del medio ambiente como pueden ser fuentes de contaminación difusas, erosión, cambio en el uso del suelo, agricultura, la construcción de presas, etc., con ello se exhibe un amplio espectro de los factores que causan perturbaciones (Saad, 2020).

2.2.2 Bioindicador

Los indicadores biológicos o bioindicadores son organismos vivos, partes o comunidades que responden a condiciones ambientales, indican la naturaleza de la perturbación o contaminación, con el fin de brindar información sobre la gravedad de la perturbación o la cantidad de contaminación en un área, ofreciendo información cualitativa sobre el medio ambiente y sus cambios (Cedrón & Velásquez, 2022).

Los bioindicadores pueden ser examinados con facilidad a medida que se encuentran expuestos ante las condiciones ambientales de su hábitat, hace que sean organismos altamente sensibles a la contaminación ambiental (Asif et al., 2018).

Cedrón & Velásquez (2022) mencionan que entre las principales características de un bioindicador se encuentran:

- a. Proporcionan la capacidad de recolectar contaminantes sin eliminarlos.
- b. Se pueden distribuir ampliamente.

- c. Son abundante, de escasa movilidad, y deben de ser representativos en la zona.
- d. Estar perenne o disponible en cualquier época del año y proporcionar un número suficiente de muestras para análisis o investigación.
- e. Son de fácil identificación, recolección y conexión.
- f. Resisten a las duras condiciones ambientales y de laboratorio.

Figura 1

Ventajas de los organismos bioindicadores.



Nota. El gráfico representa las ventajas sugeridas para los organismos bioindicadores (elaboración propia a partir de Parmar et al., 2016; Serafín Muñoz et al., 2022; Luna Bautista et al., 2023)

2.2.3 Bioacumulación

La bioacumulación es una característica única de ciertos organismos biológicos que pueden movilizar contaminantes dentro de sus tejidos, lo que significa que aumenta la cantidad de la sustancia en los tejidos del organismo. Es importante recalcar que se considera a un organismo bioacumulador cuando la tasa de absorción del contaminante excede la capacidad del cuerpo para eliminar la sustancia extraña. Sin embargo, la cantidad de contaminación acumulada depende de factores tales como: la naturaleza química de la contaminación, el tipo de organismo, su estado fisiológico, la temperatura del agua y la salinidad (Coto, 2014 como se citó en Cornejo & Chalen, 2022).

Sandhi et al. (2018) manifiestan que el factor de bioconcentración o bioacumulación (BCF), que se define para aire, suelo o agua, es utilizado para medir la capacidad de captación que presenta una planta de un metal pesado presente en su entorno, en términos de la

concentración del metal. se define como la relación entre la concentración de metales pesados en la planta y la concentración del metal en el cultivo medio.

$$BCF = \frac{([CC] \text{ elemento}) \text{ planta } T.}{([CC] \text{ elemento}) \text{ medio } T.}$$

Donde [CC] es la concentración del elemento en la planta y el medio y *T.* representa el tiempo final de exposición. Para definir a una planta como potencialmente hiperacumuladoras, se requiere que el BCF sea mayor a 10. Si el BCF es mayor a 1 se suele considerar como acumuladora. Si este factor se encuentra por debajo de 1 se define a la planta como exclusora (Azevedo & Rodríguez, 2012 como se citó en Reyes 2021).

2.2.4 Metales pesados

El término "metales pesados" se usa habitualmente para describir un grupo de metales y metaloides que poseen una masa atómica elevada, superior a 5 g·cm⁻³. Algunos investigadores se refieren a ellos como "metales tóxicos" o "metales traza". Aunque a menudo se asocia el término con una connotación negativa debido a su capacidad para contaminar y dañar el medio ambiente, es importante destacar que varios de estos metales son esenciales para el desarrollo de plantas y animales. Este grupo incluye elementos como As, Cd, cromo (Cr), cobalto (Co), cobre (Cu), Hg, Pb, Mn, níquel (Ni), selenio (Se), y zinc (Zn) (Hernández et al., 2022).

Sin embargo, cuando se encuentran en concentraciones elevadas, pueden ser nocivos. El incremento en la contaminación por estos metales pesados se atribuye principalmente a las actividades humanas como la minería, el uso de pesticidas y fertilizantes, la quema de combustibles fósiles, la agricultura, la silvicultura, la descarga de desechos en cuerpos de agua y los procesos industriales (Alengebawy et al., 2021).

2.2.5 Cadmio (Cd)

El cadmio (Cd), es un elemento metálico de número atómico 48 y masa atómica 112,41, comparte muchas propiedades físicas y químicas con el Hg y el Zn formando así el grupo 12 en la tabla periódica. Su presencia natural en el medio ambiente se debe principalmente a 32 actividades volcánicas, incendios forestales y a la erosión de las rocas (Ramírez, 2016; Villón, 2022). De tal manera, el cadmio se encuentra presente en la corteza terrestre de manera natural. Por la contaminación ambiental y otros factores su concentración en suelos y fuentes de agua se ha incrementado con el paso de los años. Los alimentos en

los que generalmente se encuentran mayores concentraciones de cadmio son mariscos, mejillones, champiñones, cacao, etc. (Falero, 2020).

El Cd suele liberarse al ambiente por medio de industrias de fabricación de batería níquel-cadmio, agentes anticorrosivos y pigmentos (Saleh et al., 2017). El límite máximo permitido (LMP) de Cd según la normativa canadiense es de 0.7 mg kg^{-1} (Pernia et al., 2019). Sin embargo, según el registro oficial publicado por el Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE, 2015) para los parámetros inorgánicos en suelos, el límite máximo permitido es de 0.5 mg/kg .

El Cd es un metal tóxico de carácter acumulativo en los cuerpos de los seres vivos, en el ser humano causa enfermedades como: retraso del crecimiento, cáncer, toxicidad renal y hepática (Zhang & Mindy, 2019).

2.2.6 Arsénico (As)

El arsénico es un elemento ampliamente distribuido en la atmósfera, en la hidrósfera y en la biósfera, el cual está presente en cuatro estados de oxidación -3, 0, +3 y +5. Según Clemens (2016) el arsénico se puede presentar en las plantas como arsenato As (V), arsenito As (III) y especies metiladas de As (V) por bacterias presentes en la rizosfera y por la biotransformación que sufre el elemento durante el proceso de absorción y translocación al interior de la planta.

El arsénico en su forma inorgánica es muy tóxico, llega al alcance de los seres humanos por agua contaminada usada para: beber, preparar alimentos, regar cultivos y realizar procesos industriales. Se encuentra naturalmente en aguas subterráneas contaminadas, (World Health Organization, 2018). El límite permitido (LP) de As en fuentes naturales de agua superficial y de suelo en Ecuador es 12 mg kg^{-1} y según la normativa canadiense de sedimentos 7.24 mg kg^{-1} (Aveiga et al., 2020).

El consumo prolongado de arsénico inorgánico puede causar intoxicación crónica que se manifiesta mediante: vómitos, dolor abdominal, diarrea, lesiones cutáneas y cáncer a la piel. Por consecuencia, aparecen otras secuelas como: entumecimiento u hormigueo en manos y pies o calambres musculares y en casos extremos la muerte (World Health Organization, 2018).

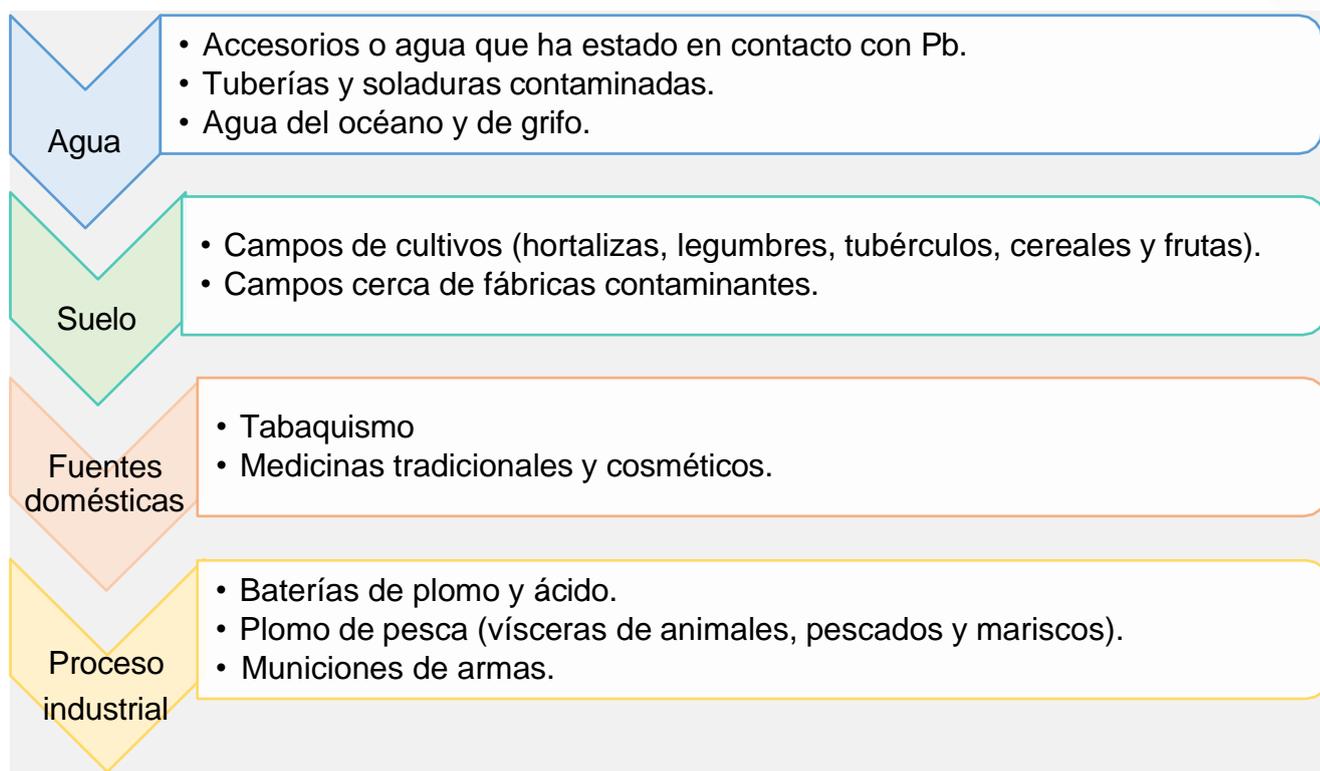
2.2.7 Plomo (Pb)

El plomo es un metal del grupo IV A de la tabla periódica. Su número atómico es 82, peso molecular $207,90 \text{ g/mol}$ y en su forma pura es de color gris azulado. El plomo es un metal pesado, y se lo considera como tal por que resiste a la corrosión, maleabilidad, bajo punto

de fusión y una facilidad para formar aleaciones con cobre, arsénico, cadmio, etc. Se oxida fácilmente a iones Pb^{+2} y Pb^{+4} (Escobar, 2016).

Figura 2

Fuentes de exposición al Pb.



Nota. El gráfico representa las fuentes exógenas de exposición del Pb (elaboración propia a partir de Salas et al., 2019; Apraez, 2023).

Por consiguiente, se conoce que el límite permitido (LP) de Pb según el Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE, 2015) para los parámetros inorgánicos en suelos, es de 19 mg/kg. Sin embargo, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) estableció que el LP de Pb en el agua potable pública es de 15 $\mu\text{g/L}$, aunque muchos expertos en toxicología creen que el nivel seguro debe ser de 10 $\mu\text{g/L}$ o menos, dado a que no representa ningún beneficio al cuerpo humano (Swistock, 2023).

Parker (2021) considera que el Pb es una neurotoxina que actúa violentamente impidiendo la normalidad del funcionamiento del sistema: óseo, nervioso y muscular. Se asocia a este metal con enfermedades como: depresión grave, reducido coeficiente intelectual, trastornos de ansiedad; además, el alto nivel en los cuerpos genera: estreñimiento crónico, dolores de: cabeza, cuerpo, articulaciones y músculos.

2.2.8 *Pseudosamanea guachapele*

De acuerdo a Echeverry (2011) y Apreciado (2023) el Guachapelí (*Pseudosamanea guachapele*) es originario de bosques siempreverde piemontano y húmedos, se lo puede encontrar en América desde sureste de México, hasta Ecuador, se caracteriza por desarrollarse en hábitats de 0 a 800 msnm de altitud, es resistente a pequeños incendios, pero no es capaz de tolerar mal drenaje o inundaciones.

Tabla 2

Clasificación taxonómica del ejemplar arbóreo Guachapelí.

| Taxonomía | |
|-------------------|---------------------------------|
| Reino | Plantae |
| Orden | Fabales |
| Familia | Leguminosae |
| Subfamilia | Mimosaceae |
| Género | <i>Pseudosamanea</i> |
| Especie | <i>Guachapele</i> |
| Nombre científico | <i>Pseudosamanea guachapele</i> |
| Nombre común | Guachapelí |

Nota. Esta tabla representa la taxonomía de la especie *Pseudosamanea guachapele* (elaboración propia a partir de Peñalver, 2018; Apreciado, 2023).

De tal manera, se contempla que el Guachapelí puede adaptarse fácilmente a diferentes condiciones climáticas, lo que lo hace una especie a considerar en programas de reforestación debido a su resistencia y adaptabilidad.

Además, se conoce también que es una especie caducifolia debido a que requiere una temporada seca anual de 4-5 meses aproximadamente, crece un aproximado de 30 m de altura con tronco más de 30 cm de DAP, sus hojas son compuestas, bipinnadas y alternas grandes de 30 cm aproximadamente. Sus flores tienen estambres largos y numerosos de color blanco o crema en grandes racimos y el fruto es un frijol plano y seco de color marrón oscuro (Peñalver, 2018).

Figura 3

Representación de las hojas y floración de la especie *P. guachapele*.



Nota. La siguiente imagen muestra las características correspondientes a la morfología foliar y floración de la especie *Pseudosamanea guachapele* tomada por Cornejo (2015).

Cornejo (2015) mencionó que dentro de las características de la especie se destacan a la madera debido a su compactibilidad, fácil manejo, durabilidad y su resistencia al agua de mar y a los insectos perforadores.

2.2.9 Humedales

Los humedales constituyen como uno de los ecosistemas más diversos biológicamente, ya que albergan una gran abundancia de especies, son fundamentales para salvaguardar la vida, poseen valores intrínsecos que los ubican como ecosistemas estratégicos en la sostenibilidad ambiental, planetaria y local (Secretaría de la Convención sobre los Humedales, 2021).

Fennell (2020) da a conocer que los humedales no son ecosistemas exclusivamente terrestres o acuáticos; más bien, pueden ser dinámicos, todo dependerá de las condiciones climáticas variable en el tiempo. Esta característica dinámica influye significativamente en las comunidades de plantas y animales. Son retenedores de carbono, reguladores del ciclo del agua y del sistema climático, además, amortiguadores de desastres naturales (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2018).

El Ministerio de Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE, 2015) indica que en el Ecuador existe, hasta el momento, 19 humedales de importancia internacional o humedales Ramsar que cubren una superficie de 1'064,483 ha. Estos 19 humedales han cumplido al menos uno de los nueve criterios establecidos por la Convención sobre Humedales. La Convención sobre los Humedales es un tratado intergubernamental aprobado el 2 de febrero de 1971 en la ciudad iraní de Ramsar, situada en la costa meridional del Mar Caspio. Ramsar es el primero de los modernos tratados intergubernamentales mundiales sobre conservación y uso racional de los recursos naturales.

Ecuador es parte contratante desde 1990, entró en vigencia el 7 de enero de 1991. A la fecha el país ha designado 18 sitios que abarcan alrededor de 286.659 ha, de las cuales el 86% se encuentra dentro de áreas protegidas y el 14% no cuenta con una categoría de protección oficial RAMSAR (MAATE, 2015).

En el presente trabajo, uno de los sitios de muestreo se realizó en los alrededores del humedal “La Tembladera”, sitio Ramsar que se encuentra en un área no protegida de la provincia de el Oro y posee 1471 ha de superficie. A continuación, se citan los sitios RAMSAR del Ecuador ubicados en las diferentes provincias del Ecuador, se encuentren estos en áreas protegidas o no.

Tabla 3

Listado de los sitios RAMSAR del Ecuador.

| Nro | Sitio Ramsar | Área protegida | Designación | Provincia | Superficie ha |
|------------|-----------------------------------|-----------------------|--------------------|------------------|----------------------|
| 1 | Manglares/Churute | Si | 07/09/1990 | Guayas | 35042 |
| 2 | Parque Nacional Machalilla | Si | 07/09/1990 | Manabí | 14430 |
| 3 | Reserva biológica de “Limoncocha” | Si | 10/07/1998 | Sucumbios | 4613 |
| 4 | Isla Santay | Si | 31/10/2000 | Guayas | 4705 |
| 5 | Laguna de Cube | Si | 02/02/2002 | Esmeraldas | 113 |

| | | | | | |
|----|----------------------------------------------|----|------------|-------------------------|--------|
| 6 | Refugio de vida silvestre "Isla Santa Clara" | Si | 02/02/2002 | El Oro | 46 |
| 7 | Parque Nacional Cajas | Si | 14/08/2002 | Azuay | 29477 |
| 8 | Humedales del sur de Isabela | Si | 17/09/2002 | Galápagos | 872 |
| 9 | Reserva ecológica Cayapas - Mataje | Si | 12/06/2003 | Esmeraldas | 44847 |
| 10 | Complejo "Ñucanch Turupamba" | Si | 05/06/2006 | Napo - Pichinch | 12290 |
| 11 | Complejo "Llanganati" | Si | 25/06/2008 | Tungurahua | 30355 |
| 12 | Reserva ecológica "El Ángel" | Si | 07/12/2012 | Carchi | 17003 |
| 13 | Sistema lacustre "Lagunas del compadre" | Si | 15/12/2012 | Loja y Zamora Chinchipe | 23962 |
| 14 | Sistema lacustre "Yacuri" | Si | 15/12/2012 | Loja y Zamora Chinchipe | 27760 |
| 15 | Complejo "Cuyabeno Lagartococha Yasuni" | Si | 24/08/2017 | Sucumbios y Orellana | 773668 |
| 16 | Abras/mantequilla | No | 14/03/2000 | Los Ríos | 22500 |
| 17 | La Segua | No | 07/06/2000 | Manabí | 1836 |
| 18 | La Tembladera | No | 06/12/2011 | El Oro | 1471 |
| 19 | Manglares del Golfo de Guayaquil "Don Goyo" | No | 02/02/2012 | Guayas | 15337 |

Nota. Esta tabla muestra los sitios RAMSAR con la información sobre las áreas protegidas que forman, fecha de designación, provincia en la que están y superficie (MAATE, 2015).

2.2.10 Minería

La minería implica una compleja interacción de factores sociales, económicos, tecnológicos, ambientales y de salud, que pueden variar mucho entre contextos locales y nacionales. Por tanto, es difícil crear una definición única. El Convenio de Minamata sobre el Mercurio define la minería como “la actividad económica que consiste en la extracción o explotación de minerales y otros materiales existentes en el suelo para procesarlos y luego comercializarlos” (Cepeda & Hernández, 2020).

En el Ecuador, se han identificado una serie de momentos históricos en el desarrollo de la pequeña minería metálica en el Ecuador. El surgimiento de la pequeña minería se dio a finales de la década del 70 a raíz de la quiebra de la Compañía Industrial Minera Asociada – CIMA (empresa de capital mixto) que explotaba oro en el sur del Ecuador, en el sector Portovelo – Zaruma (Gaona & Vaca, 2023).

El Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica (MAATE, 2021) ha identificado afectaciones ambientales a causa de la minería, mismas que han puesto en riesgo el entorno natural e incluso urbano de varios sectores de diversas provincias, donde ha existido socavones, erosión del suelo, pérdida de la cobertura vegetal, biodiversidad y espacios paisajísticos, contaminación del suelo y del agua por combustibles y químicos.

2.2.11 Fitorremediación

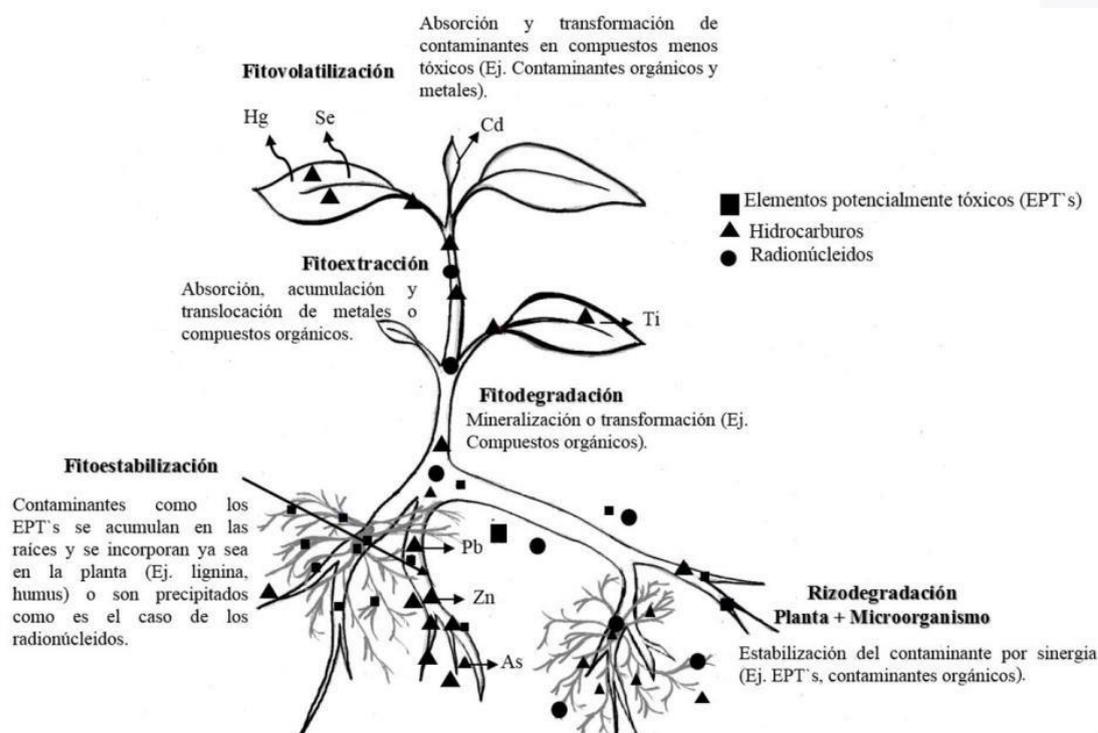
La fitorremediación (del griego “phyto” o “planta”), también llamada fitolimpieza o fitocorrección, incluye cualquier proceso biológico, químico o físico, inducido por las plantas, que ayude en la absorción, degradación y metabolización de los contaminantes, ya sea por las plantas mismas o por los microorganismos que se desarrollan en la rizosfera. Este proceso denominado “fitorremediación” consiste en la remoción, transferencia, estabilización y/o degradación y neutralización de compuestos tóxicos (Papuico, 2019).

López (2011) menciona que el concepto de usar plantas para limpiar suelos contaminados no es nuevo, desde hace 300 años las plantas fueron propuestas para el uso en el tratamiento de aguas residuales (plantas acuáticas en aguas contaminadas con plomo, cobre, cadmio, hierro y mercurio). Por consiguiente, este proceso se puede seguir con tecnologías biotecnológicas que analizan la capacidad de las plantas para acumular diferentes metales en distintos órganos de las especies vegetales empleando a plantas para absorber, acumular y estabilizar contaminantes en el ambiente.

Estudios como el de Maldonado et al. (2016) mencionan que en general el proceso de fitorremediación puede ocurrir de tres formas, en la primera la rizosfera mejora las propiedades físico-químicas de los suelos contaminados al favorecer la aireación e ingreso de nutrimentos; la segunda consiste en la comunicación directa entre vegetal y microorganismo, favoreciendo al desarrollo selectivo de los microorganismos degradadores del contaminante; la tercer forma consiste en la degradación del contaminante por la planta mediante la extracción de agua hacia la parte aérea favoreciendo la inmovilización - degradación del contaminante en la raíz y parte aérea.

Figura 4

Estrategias de fitorremediación.



Nota. Principales estrategias en la fitorremediación. En el sistema suelo-planta microorganismo los elementos potencialmente tóxicos (cuadros), hidrocarburos (triángulos) y radionúcleidos (círculos) pueden ser transformados, metabolizados o acumulados en puntos específicos del sistema (Maldonado et al., 2016).

2.3. Marco Teórico

En Ecuador, aunque se han llevado a cabo estudios sobre la contaminación por metales pesados en diversas especies, existe desconocimiento en el conocimiento que se relaciona con la utilización de especies específicas de árboles, como la *Pseudosamanea guachapele*, en regiones específicas de Guayas y el Oro. Los estudios actuales se enfocan principalmente en otros organismos faunísticos como bioindicadores, dando lugar a un vacío en cuanto a cómo las especies arbóreas pueden actuar como conductores de la contaminación por metales pesados en zonas agrícolas y urbanas de alta actividad industrial.

Desde la perspectiva teórica e ideológica del presente estudio, se destaca el enfoque del desarrollo sostenible y la ecología política, en el cual se reconoce la relevancia de la preservación de los recursos naturales y la necesidad de proteger a las poblaciones vulnerables ante los efectos de la contaminación. Se pretende, desde una perspectiva ecológica y de justicia ambiental, generar evidencia científica que respalde políticas públicas centradas en la mitigación de la contaminación por metales pesados en áreas rurales e industriales, desde una perspectiva ecológica y de un enfoque ambiental.

Por consiguiente, el biomonitoreo implica la utilización de organismos vivos para evaluar la salud ambiental, especialmente en lo que respecta a la contaminación. Las plantas como *Pseudosamanea guachapele* pueden acumular metales pesados del suelo y el aire, lo que las convierte en excelentes indicadores de contaminación ambiental. Este método es particularmente útil en áreas urbanas e industriales donde la contaminación por metales pesados es frecuente debido a la actividad humana, como la minería, la agricultura y los procesos industriales.

En conclusión, se ha considerado el uso de la biotecnología para monitorear los metales pesados y la utilización de especies bioindicadoras como es el caso de la especie arbórea nativa *Pseudosamanea guachapele* quien no solo proporciona una herramienta útil para evaluar la contaminación, sino que también contribuye al desarrollo de soluciones sostenibles para reducir la contaminación en Ecuador y brindar conocimiento a la población aledaña sobre lo desconocido. De tal manera, la biotecnología ayuda a optimizar los procesos naturales de absorción y transformación de metales pesados, lo que permite un monitoreo más eficiente y preciso.

CAPÍTULO III: Diseño Metodológico

3.1. Tipo y diseño de investigación

La presente investigación se considera es de tipo cuantitativa y cualitativa, es decir, emplea un enfoque mixto. El tipo cuantitativo se ha empleado para medir la concentración de metales pesados (Cd, As y Pb) en las raíces de la especie *Pseudosamanea guachapele* y en el suelo de las zonas de muestreo ubicadas en las provincias de Guayas y el Oro en Ecuador. El enfoque cualitativo se ha utilizado para interpretar los resultados obtenidos y establecer la relación entre la concentración de metales pesados en el suelo y en la especie antes mencionada. Los métodos teóricos y prácticos empleados aportan datos específicos sobre la concentración de metales pesados en las áreas de estudio.

Sin embargo, desde el punto de vista cuantitativo, la investigación presenta un diseño no experimental y de tipo transversal. El diseño no experimental se justifica debido a que, no se han manipulado las variables independientes (concentración de metales pesados en la especie de estudio y el suelo), ya que estas fueron determinadas por factores ambientales y antrópicos preexistentes. Por otro lado, el diseño transversal se debe a que los datos se han recopilado una sola vez, en un solo momento en cada una de las localidades de estudio, lo cual facilita la comparación entre estas y su evaluación.

Esta investigación alcanza un nivel exploratorio, ya que introduce a una especie bioindicadora no utilizada previamente en el monitoreo de estos metales pesados en las provincias de estudio específicas en el Ecuador. Pero al mismo tiempo, también puede llegar a ser explicativo al ser planteado para identificar y explicar los mecanismos por los cuales los metales pesados llegan al ecosistema, cómo interactúan con el bioindicador, y qué impacto tienen en el ambiente y la salud pública.

Por consiguiente, el enfoque mixto consiste en un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos que implican la recolección, análisis, integración y discusión conjunta de datos cuantitativos y cualitativos. Este enfoque permite obtener una perspectiva más amplia y profunda de los fenómenos estudiados al combinar las fortalezas de ambos enfoques, aportando mayor seguridad en las inferencias científicas (Hernández et al., 2014).

De modo que, esta investigación presenta un diseño mixto exploratorio secuencial debido a que, combina una fase cualitativa inicial explorando el contexto y las percepciones de las localidades de estudio, ya que, en la fase inicial, se realizó un diagnóstico preliminar

con las muestras de las raíces en tres especies correspondientes a una zona aledaña al estudio realizado en el Río Amarillo (Portovelo), junto a los sedimentos, destacando la especie *Pseudosamanea guachapele* para el objetivo de estudio, seguida de una fase cuantitativa en la que se miden los niveles de contaminación de la especie y el suelo.

3.2. La población y la muestra

Las muestras de la especie *Pseudosamanea guachapele* y de suelo fueron obtenidas en las siguientes cuatro localidades de estudio durante los meses de mayo - julio, siendo estas:

Muestras de control: Prov. Guayas – Guayaquil - Universidad de Guayaquil “Facultad de Ciencias Naturales”

Muestras de estudio:

1.- Prov. el Oro – Portovelo (puente negro – Río Amarillo) y Sta. Rosa (alrededores del Humedal “La Tembladera”)

2.- Prov. Guayas – Guayaquil: Bosque Protector “Cerro Blanco”

3.2.1 Características de la población

La población del estudio está constituida por muestras extraídas de la zona radicular de la especie *Pseudosamanea guachapele* en ejemplares de aproximadamente 2,50 m de altura, que se encuentran distribuidos en las provincias de Guayas y el Oro, Ecuador. Además, se incluye el suelo de las localidades seleccionadas para el análisis de la contaminación por metales pesados (Cd, As y Pb).

3.2.2 Delimitación de la población

Una parte de la población se limita a la localidad ubicada en la provincia del Guayas que presenta ejemplares de la especie en un estado de adultez, con un espacio considerable entre los efectos industriales y/o de transporte, así como antropogénicos para la selección de los ejemplares de control.

Con respecto al resto de la población que se encuentra en las localidades de estudio ubicadas en las provincias del Guayas y el Oro, fueron seleccionadas con base en antecedentes literarios, considerando a áreas afectadas por actividades humanas que

podrían estar relacionadas con la contaminación por metales pesados como la industria, antropogénica o minería, disponiendo como prioridad la accesibilidad en las zonas de muestreo y la disponibilidad de la especie en una etapa adulta.

3.2.3 Tipo de muestra

El tipo de muestra es no probabilística, de tipo intencional o dirigida, debido a que, las localidades y los ejemplares de *Pseudosamanea guachapele* y el suelo del cual emergen fueron seleccionados al azar para asegurar que las muestras incluyan áreas con posibles zonas expuestas a la contaminación por metales pesados, así como la de ejemplares representativos de la especie en otros entornos con menos exposición.

3.2.4 Tamaño de la muestra

En cada una de las cuatro localidades de estudio, se tomaron 500 g de muestras (raíces) por cada uno de 3 ejemplares de la especie *Pseudosamanea guachapele*, lo que da un total de 1,500 g de tejido radicular vegetal por localidad. Adicionalmente, se tomaron 500 g de suelo de una toma intermedia (de 20 a 60 cm) de profundidad en cada localidad. En total, se recolectaron 2,000 g de muestra por cada localidad (1,500 g de planta + 500 g de suelo), para un total de 8,000 g de muestra entre las cuatro localidades.

3.2.5 Proceso de selección de la muestra

El proceso de selección involucró la identificación de tres ejemplares de *Pseudosamanea guachapele* en función de sus características morfológicas en cada localidad. Estos ejemplares fueron seleccionados de acuerdo con su ubicación en las áreas de interés. Además, se recogieron muestras de suelo por cada número de los ejemplares correspondientes a cada localidad en las cercanías de las raíces de los especímenes seleccionados.

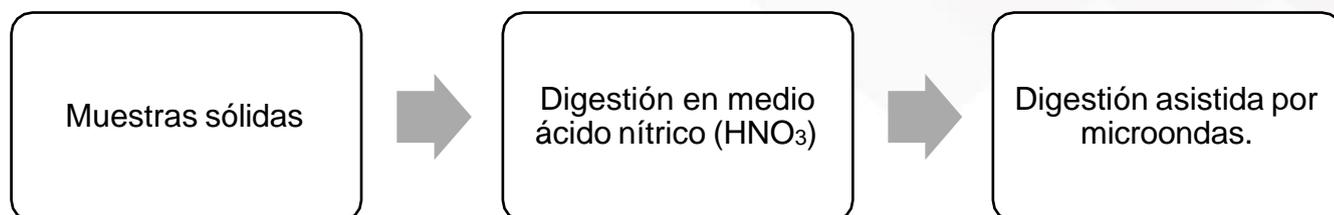
3.3. Los métodos y las técnicas

3.3.1 Metodología analítica en muestras sólidas

Las muestras vegetales y de sedimento correspondientes al análisis preliminar fueron tratadas en el estado sólido (original) con base en el siguiente proceso que se explica en la figura 5. De esta manera, los elementos se vuelven disponibles para el análisis.

Figura 5

Tratamiento de las muestras sólidas para su respectivo análisis.



Nota. La siguiente figura muestra en detalle el procedimiento a seguir en el análisis de las diferentes técnicas analíticas para las muestras sólidas. Las muestras se preparan de acuerdo con el procedimiento de digestión de ácida descrito en el método 3051 de la EPA (elaboración propia a partir de ANAVANLAB, 2024).

3.3.2 Digestión por microonda

- Sacar una porción significativa de muestra en un plato plástico y dejar secar al ambiente por alrededor de 24 horas.
- Pesar 0,5 g (peso seco) en un plato plástico y transferir a un vial de digestión PFA seco y limpio.
- Colocar los viales de digestión limpios y secos dentro de las chaquetas numeradas y ordenar ascendentemente.
- Registrar la muestra y número de vial correspondiente en el formato PES-010601.
- Añadir 10 mL de ácido nítrico concentrado a cada vial. Tapar los viales.
- Encender el extractor del microondas.
- Encender el microondas y seleccionar el método EPA para digestión en sólidos.
- Iniciar el programa, presionando START.
- Una vez terminado el programa dejar que se enfríe hasta por lo menos 60°C y sacar del equipo. Dejar que los viales se enfríen completamente.
- Llevar los viales a una campana de extracción.
- Sacar el vial, abrirlo con cuidado y transferir a un embudo de vidrio con papel filtro, recoger el filtrado en un envase de 25 mL. Realizar un lavado con agua desionizada, sin sobrepasar el volumen de 25 mL del balón aforado.
- Aforar con agua desionizada. Pasar a los viales de lectura del ICP-MS o para el análisis por Absorción Atómica.

3.3.3 Espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP – MS)

Para el estudio preliminar de diagnóstico realizado en Portovelo – el Oro (Puente negro a las cercanías del Río Amarillo) al ser un lugar desconocido con respecto a los registros biológicos de la vegetación y de los posibles metales presentes en el lugar, se optó por recopilar muestras de tres ejemplares arbóreos y de los sedimentos del lugar cercano al Río Amarillo, vertiente que facilita la irrigación a la vegetación del lugar. Cada muestra recolectada cumplió con el estándar de peso (500 g) sugerido para su posterior análisis. Con la finalidad de conocer el análisis fisicoquímico del lugar y la capacidad de bioacumulación de los especímenes, estos han sido seleccionados por su abundancia, disponibilidad y accesibilidad en la zona de muestreo, siendo estos: *Mangífera índica*, *Senna siamea* y *Pseudosamanea guachapele*.

El análisis fisicoquímico fue ejecutado en el laboratorio de ANAVANLAB (Analítica Avanzada, Asesoría y Laboratorios CIA – LTDA, 2024) siguiendo los requisitos establecidos en la norma NTE INEN ISO/IEC 17025:2018, la cual exige una adecuada gestión de las instalaciones, del personal, de los equipos, de la validación de métodos analíticos y del control de calidad de los ensayos, entre otros.

A continuación, se detalla el procedimiento metodológico empleado para el análisis de metales en muestras vegetales cubierto por su validación.

Tabla 4

Procedimiento metodológico empleado para el análisis de metales mediante la técnica de ICP - MS en las muestras vegetales y de sedimento.

| Características | Descripción |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Ensayo | Metales en muestras sólidas |
| Procedimiento específico | AAA-PE-S016 |
| Matriz | Suelos, sedimentos, lodos, resinas, alimentos, vegetales, entre otros. |
| Técnica | ICP – MS |
| Rango | Tabla 5 |
| Método de referencia | EPA 6020B. Rev 2 julio 2014 Digestión ácida: método EPA 3051. |

Nota. Esta tabla muestra el resumen del procedimiento metodológico empleado para el análisis de metales en las muestras vegetales y de sedimento utilizado en el análisis preliminar de diagnóstico (ANAVANLAB, 2024).

Tabla 5

Metodología analítica - lista de los metales disponibles para el análisis de ICP - MS en muestras vegetales y de sedimento.

| Metal | Rango de trabajo (mg/Kg) | Dilución máxima |
|----------------|---------------------------------|------------------------|
| Aluminio (Al) | 5 a 100 000 mg/Kg | 1000 |
| Antimonio (Sb) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Arsénico (As) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Bario (Ba) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Berilio (Be) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Bismuto (Bi) | 0,5 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Boro (B) | 5 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Cadmio (Cd) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Calcio (Ca) | 50 a 500 000 mg/Kg | 1000 |
| Cerio (Ce) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Cesio (Cs) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Cobalto (Co) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Cobre (Cu) | 0,5 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Cromo (Cr) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Disproσιο (Dy) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Erbio (Er) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Escandio (Sc) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Estaño (Sn) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Estroncio (Sr) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Europio (Eu) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Fósforo (P) | 10 a 500 000 mg/Kg | 1000 |
| Gadolinio (Gd) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Galio (Ga) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Germanio (Ge) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Hafnio (Hf) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |

| | | |
|------------------|--------------------|------|
| Hierro (Fe) | 50 a 500 000 mg/Kg | 1000 |
| Holmio (Ho) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Indio (In) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Iridio (Ir) | 0,5 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Ytrio (Y) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Lantano (La) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Litio (Li) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Lutecio (Lu) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Magnesio (Mg) | 50 a 500 000 mg/Kg | 1000 |
| Manganeso (Mn) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Molibdeno (Mo) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Neodimio (Nd) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Niobio (Nb) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Níquel (Ni) | 0,5 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Oro (Au) | 0,5 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Osmio (Os) | 0,5 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Paladio (Pd) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Plata (Ag) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Platino (Pt) | 0,5 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Plomo (Hg) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Potasio (K) | 50 a 500 000 mg/Kg | 1000 |
| Praseodimio (Pr) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Renio (Re) | 0,5 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Rodio (Rh) | 0,5 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Rubidio (Rb) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Rutenio (Ru) | 0,5 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Samario (Sm) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Selenio (Se) | 0,5 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Silicio (Si) | 50 a 500 000 mg/Kg | 1000 |
| Sodio (Na) | 50 a 500 000 mg/Kg | 1000 |
| Talio (Tl) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Tantalio (Ta) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Telurio (Te) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |

| | | |
|-------------------------|------------------|------|
| Terbio (Tb) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Titanio (Ti) | 0,5 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Torio (Th) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Tulio (Tm) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Tungsteno/Wolframio (W) | 1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Uranio (U) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Vanadio (V) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Yterbio (Yb) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Zinc (Zn) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Zirconio (Zr) | 0,1 a 5000 mg/Kg | 1000 |
| Mercurio (Hg) | 0,05 a 500 mg/Kg | 1000 |

Nota. Esta tabla presenta la lista de los metales identificados mediante la técnica de ICP – MS en el análisis preliminar de la fase inicial en el estudio (ANAVANLAB, 2024).

La espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP - MS), es altamente sensible y capaz de determinar de forma cuantitativa casi todos los elementos presentes en la tabla periódica con un potencial de ionización menor a concentraciones muy bajas (nanogramo/litro o parte por trillón, ppt). Se basa en el acoplamiento de un método para generar iones (plasma acoplado inductivamente) y un método para separar y detectar los iones (espectrómetro de masas) (ANAVANLAB, 2024).

La realización del método de ICP – MS se detalla a continuación en los siguientes pasos (ANAVANLAB, 2024):

1. El ICP-MS siempre se encuentra encendido en modo de espera, por lo que hay que asegurar que los gases de argón y helio estén abiertos y tengan la presión apropiada.
2. Ingresar al software del equipo, encender el plasma y realizar la corrida de verificación de ajuste de las condiciones con la solución de acondicionamiento.
3. Colocar las muestras en los espacios disponibles del automuestreador.
4. Abrir el método de metales y crear una secuencia que incluya curvas de calibración, blancos, estándares de control y muestras, indicar para cada caso la posición de los viales en el automuestreador.

5. Una vez que el equipo se encuentre listo, iniciar la secuencia de lecturas, asegurarse de que siempre se encuentre disponible agua de lavado en el contenedor respectivo.
6. Al finalizar la corrida revisar los resultados y realizar los cálculos según el peso de muestra digerida, volumen de aforo y factor de dilución, si se realizó diluciones.

La lectura de la muestra dada por el equipo en $\mu\text{g/L}$ se utiliza en la siguiente ecuación para obtener la concentración de metal en mg/Kg :

$$C \text{ metal } \left(\frac{\text{mg}}{\text{Kg}} \right) = X \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{L}} \right) \times \frac{V \text{ aforo (mL)}}{\text{Peso muestra (g)} \times 1000} \times \text{FD}$$

Dónde:

X: Concentración del metal en $\mu\text{g/L}$ dado por el equipo. V

aforo: Volumen de aforo de la digestión (25 mL)

Peso muestra: peso muestra para la digestión en gramos (0,5 g)

FD: Factor de dilución de la muestra, si aplica.

3.3.4 Absorción atómica de llama

Para el análisis en las muestras vegetales sólidas de la especie *Pseudosamanea guachapele* y suelos se empleó el procedimiento metodológico descrito en las tablas 6 y 7. Por consiguiente, el análisis de los metales pesados de Cd y Pb se realizó por el método de absorción atómica de llama y el del As por absorción atómica en la generación de hidruros.

De tal manera, según la metodología analítica empleada por ANAVANLAB (2024) para la realización del proceso se debe de:

1. Encender el Espectrofotómetro de Absorción Atómica (EAA) y esperar a que se estabilice. Asegurar que los gases aire, acetileno y argón estén abiertos y tengan la presión apropiada.
2. Ingresar al software del equipo, encender la lámpara del metal y escoger el método del metal.

Tabla 6

Metodología analítica empleada para el análisis de cadmio y plomo mediante la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica de Llama en las muestras vegetales y de suelo.

| Características | Descripción |
|--------------------------|---------------------------------------------------|
| Ensayo | Metales por Absorción Atómica de llama. |
| Procedimiento específico | AAA-PE-S011 |
| Matriz | Vegetales y suelos |
| Técnica | Espectrofotometría de Absorción Atómica de Llama. |
| Rango | Cadmio (0,1 a 50) mg/Kg Plomo (5 a 500) mg/Kg |
| Método de referencia | Mercurio: EPA 7061 A. 1992; EPA 3015, 2007. |

Nota. Esta tabla muestra el resumen del procedimiento empleado para el análisis de los metales pesados (Cd y Pb) de las muestras correspondientes a *Pseudosamanea guachapele* en los sitios de muestreo y de los suelos (ANAVANLAB, 2024).

Tabla 7

Metodología analítica empleada para el análisis del arsénico mediante la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS) y generación de hidruros en las muestras vegetales y de suelo.

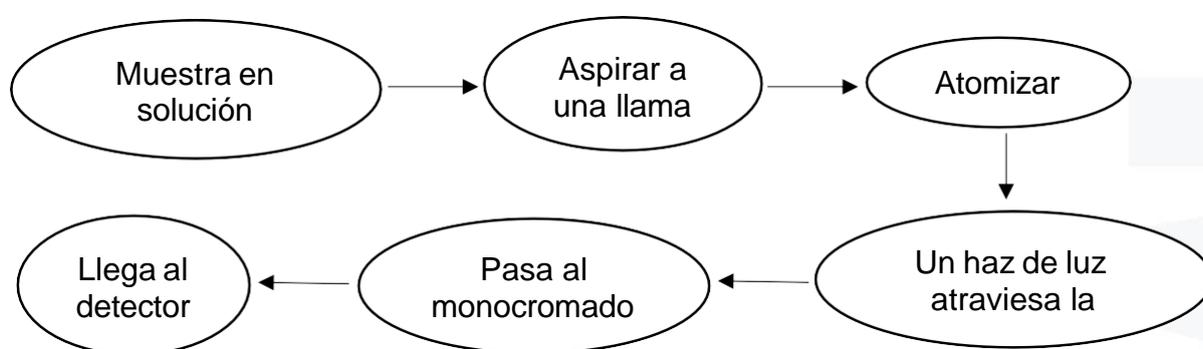
| Características | Descripción |
|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Ensayo | Metales por Absorción Atómica y generación de hidruros. |
| Procedimiento específico | AAA-PE-S012 |
| Matriz | Suelos, sedimentos, vegetales. |
| Técnica | Espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS) – generación de hidruros. |
| Rango | Arsénico (0,1 a 50) mg/Kg |
| Método de referencia | Arsénico: EPA 6020B / EPA 3051, 2007. |

Nota. La siguiente tabla muestra el resumen del procedimiento empleado para el análisis del metal pesado (As) de las muestras correspondientes a *Pseudosamanea guachapele* en los sitios de muestreo y de los suelos (ANAVANLAB, 2024).

En espectrofotometría de absorción atómica se determina metales si se encuentran en solución, por lo tanto, suelos, lodos, sedimentos y otros residuos sólidos requieren ser digeridos para el análisis como se describe en la figura 6.

Figura 6

Tratamiento de las muestras en solución por absorción atómica de llama.



Nota. Descripción del análisis de los metales Cd y Pb según la cantidad de luz absorbida por el elemento atomizado en la llama cuando llega al detector (elaboración propia a partir de ANAVANLAB, 2024).

La cantidad de energía a la longitud de onda característica que fue absorbida en la llama es proporcional a la concentración del elemento en la muestra mediante el siguiente procedimiento:

1. Iniciar el ensayo aspirando la solución de estándar de sensibilidad y ajustar la posición del mechero para encontrar la máxima absorbancia.
2. Aspirar consecutivamente el blanco y los estándares de calibración del método, de acuerdo lo que el equipo solicita.
3. Verificar que la curva de calibración cumpla los criterios de validación.
4. Aspirar las muestras y registrar los resultados encontrados para cada una.

El resultado de la muestra en mg/L se utiliza en la siguiente ecuación para obtener la concentración de metal en mg/Kg:

$$C \text{ metal } \left(\frac{\text{mg}}{\text{Kg}} \right) = X \times \frac{V \text{ aforo}}{\text{Peso muestra}} \times FD$$

Dónde:

X: Concentración del metal en mg/L, dado por el equipo.

V: Volumen de aforo en mL (25 mL)

Peso muestras: peso muestra para digestión en gramos.

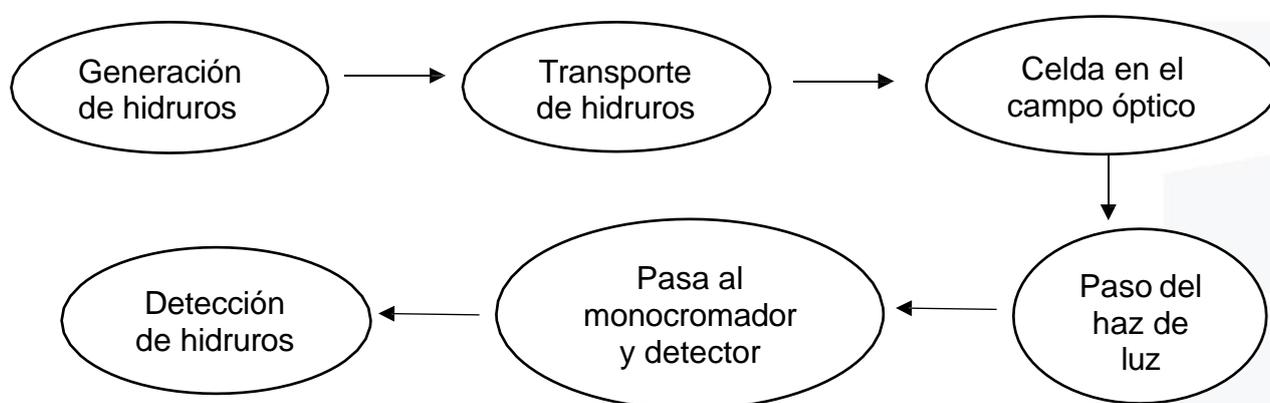
FD: Factor de dilución de la muestra, si aplica.

3.3.5 Generación de hidruros

Ciertos metales como el Sb, As, Bi, Sn, Hg, Se y Te; tienen la propiedad de reaccionar en medio ácido con boro e hidruro de sodio, para generar sus respectivos hidruros volátiles.

Figura 7

Tratamiento de las muestras en solución por generación de hidruros.



Nota. Descripción del análisis del As para generar la detección de hidruros (elaboración propia a partir de ANAVANLAB, 2024).

Explicación: se generan hidruros a partir de las muestras previamente digestadas. Los hidruros generados son transportados mediante un gas inerte (*argón*) a una celda de cuarzo. La celda de cuarzo se coloca en el campo óptico del espectrofotómetro de absorción atómica. Un haz de luz se dirige a través de la celda de cuarzo. El haz de luz pasa al monocromador y finalmente llega al detector. Los hidruros se detectan a longitudes de onda específicas para cada metal.

A continuación, se describe el proceso de la práctica para la detección del As con base en el generador de hidruros según las referencias de ANAVANLAB (2024).

1. Colocar el Generador de Hidruros cerca al mechero del espectrofotómetro y posicionar la celda en el adaptador del mechero.
2. Para el análisis de arsénico se debe encender la llama.
3. Realizar el ajuste de la celda del generador de hidruros para asegurar que el haz



UNEMI

4. Iniciar el ensayo preparando la solución de estándar de sensibilidad, colocarlo en el vial de reacción, añadir ácido clorhídrico, finalmente, colocar en el generador de hidruros y aspirar. Se verifica que la absorbancia sea adecuada.
5. Repetir el paso anterior para el blanco y los estándares de calibración del método, de acuerdo lo que el equipo solicita.
6. Verificar que la curva de calibración cumpla los criterios de validación.
7. Aspirar las muestras y registrar los resultados encontrados para cada una la llama.

El resultado de la muestra en ng se utiliza en la siguiente ecuación para obtener la concentración de metal en mg/L:

$$C_{metal} \left(\frac{mg}{kg} \right) = \frac{X}{V_{muestra} \times 1000} \times \frac{V_{aforo}}{Peso_{muestra}} \times FD$$

Dónde:

X: Concentración del metal en ng dado por el equipo

V: Volumen de aforo en mL (25 mL)

Peso muestras: peso muestra para digestión en gramos.

FD: Factor de dilución de la muestra, si aplica.

3.4. Procesamiento estadístico de la información

En relación al procesamiento estadístico de la información, se ha empleado el programa Past 4 para el análisis estadístico de los datos obtenidos, se ha realizado en primer lugar el test de la distribución normal utilizando la prueba de normalidad Shapiro-Wilk p (normal) para reconocer lo siguiente:

- Un valor p alto (generalmente mayor que 0,05) indica que no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula, lo que sugiere que los datos pueden seguir una distribución normal.
- Un valor p bajo (generalmente inferior a 0,05) indica que hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula, lo que sugiere que los datos no siguen una distribución normal.

En el caso de los datos que presentan normalidad, se ha empleado la prueba de ANOVA con el objetivo de conocer las diferencias relativas entre los grupos en comparación con la variabilidad (F) y saber si existen diferencias significativas entre las medias (p). Posteriormente, se utiliza la prueba de la igualdad de varianzas aplicando la prueba de Levene en el caso de que haya igualdad de varianzas. En caso de no existir igualdad en las varianzas se emplearán los valores de (F) y p del test de Welch.

De modo que, con la finalidad de evidenciar las diferencias significativas entre las localidades de estudio de los datos que poseen normalidad, se ha empleado la prueba de Tukey's test post hoc para determinar qué grupos son significativamente diferentes entre sí en relación con los metales pesados de la planta y el suelo.

Para el resto de las muestras con datos que no poseen una normalidad presente, se realizó la prueba de Kruskal-Wallis, para comparar las medianas entre los grupos. Además, se ha aplicado el test Dunn's post hoc para obtener un resultado significativo en la prueba de Kruskal-Wallis con la finalidad de identificar cuáles de los grupos difieren significativamente entre sí.

En el cumplimiento del último objetivo específico con respecto a la correlación entre la concentración de los metales pesados en la especie *Pseudosamanea guachapele* y las muestras del suelo se ha empleado la correlación de Spearman's debido a que la presente investigación contiene la mayor cantidad de datos con valores no normales.

CAPÍTULO IV: Análisis e Interpretación de Resultados

4.1. Análisis e Interpretación de Resultados

4.1.1 Composición de los metales en el suelo y especies vegetales (Portovelo) mediante la técnica ICP-MS.

Dando cumplimiento al primer objetivo específico de investigación, se ha empleado la técnica de la espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) en las muestras recolectadas de especies vegetales representativas y del suelo ubicado en el Puente Negro sobre el Río Amarillo (Portovelo – el Oro), zona expuesta a diversas plantas de beneficio en minería metálica. Con la finalidad de conocer los metales presentes y la capacidad de bioconcentración de los ejemplares seleccionados al azar. Se ha optado por esta técnica debido a la amplitud y determinación en una serie de metales posibles para el análisis de las muestras, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 8

Análisis de las muestras en suelo y las especies vegetales representativas de Portovelo (Puente negro - Río amarillo) mediante la técnica ICP-MS

| Elementos | Muestra de suelo | <i>Mangífera índica</i> | <i>Senna siamea</i> | <i>P. guachapele</i> | FBC <i>M. índica</i> | FBC <i>S. siamea</i> | FBC <i>P. guachapele</i> |
|-------------|------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|
| Antimonio | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | 0,63 | 0 | 0 | 0 |
| Arsénico | 9,64 | 0,99 | 3,19 | 4,7 | 0,1 | 0,3 | 0,5 |
| Bario | 51,91 | 6,34 | 5,11 | 11,11 | 0 | 0 | 0 |
| Berilio | 0,15 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | 0 | 0 | 0 |
| Cadmio | 0,69 | 0,41 | 0,68 | 0,61 | 1 | 1 | 1 |
| Calcio | 205,4 | 561,8 | 841,47 | 880,37 | 3 | 4 | 4 |
| Cerio | 9,33 | 0,27 | < 0,1 | 0,41 | 0 | 0 | 0 |
| Cesio | 0,98 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | 0 | 0 | 0 |
| Cobalto | 6,18 | 0,44 | 0,4 | 0,86 | 0 | 0 | 0 |
| Cobre | 29,64 | 6,1 | 6,9 | 34,7 | 0 | 0 | 1 |
| Cromo | 10,19 | < 0,1 | < 0,1 | 3,77 | 0 | 0 | 0 |
| Disprosidio | 0,78 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | | | |
|-------------|---------|---------|--------|---------|----|----|----|
| Erbio | 0,32 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | 0 | 0 | 0 |
| Estroncio | 8,79 | 17,71 | 19,81 | 27,27 | 2 | 2 | 3 |
| Europio | 0,2 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | 0 | 0 | 0 |
| Fósforo | 120,42 | 449,16 | 370 | 146,04 | 4 | 3 | 1 |
| Gadolinio | 0,83 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | 0 | 0 | 0 |
| Galio | 3,00 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | 0 | 0 | 0 |
| Germanio | 0,96 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | 0 | 0 | 0 |
| Hierro | 1301,22 | 241 | 198,9 | 911,7 | 0 | 0 | 0 |
| Holmio | 0,12 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | 0 | 0 | 0 |
| Itrio | 3,26 | 0,14 | < 0,1 | 0,31 | 0 | 0 | 0 |
| Lantano | 3,34 | 0,17 | < 0,1 | 0,19 | 0 | 0 | 0 |
| Litio | 8,54 | < 0,1 | < 0,1 | 0,2 | 0 | 0 | 0 |
| Magnesio | 4569,01 | 960,59 | 859,3 | 591,32 | 0 | 0 | 0 |
| Manganeso | 305,66 | 55,4 | 22,69 | 47,16 | 0 | 0 | 0 |
| Neodimio | 3,92 | 0,13 | < 0,1 | 0,21 | 0 | 0 | 0 |
| Níquel | 4,02 | 0,72 | 0,96 | 2,12 | 0 | 0 | 1 |
| Plomo | 21,29 | 1,2 | 6 | 19 | 0 | 0 | 1 |
| Potasio | 358,49 | 6658,91 | 8641,8 | 1630,83 | 19 | 24 | 5 |
| Praseodimio | 0,98 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | 0 | 0 | 0 |
| Rubidio | 1,92 | 5,94 | 3,09 | < 0,1 | 3 | 2 | 0 |
| Samario | 0,87 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | 0 | 0 | 0 |
| Selenio | 0,87 | < 0,5 | < 0,5 | < 0,5 | 0 | 0 | 0 |
| Silicio | 133,53 | < 50 | < 50 | 96,84 | 0 | 0 | 1 |
| Sodio | 105,83 | 66,02 | 65,61 | 49 | 1 | 1 | 0 |
| Terbio | 0,12 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | 0 | 0 | 0 |
| Titanio | 142,74 | 7,79 | 11,11 | 27,77 | 0 | 0 | 0 |
| Torio | 0,86 | 0,88 | 0,57 | 1,46 | 1 | 1 | 2 |
| Vanadio | 21,86 | 0,29 | 0,14 | 1,69 | 0 | 0 | 0 |
| Yterbio | 0,29 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | 0 | 0 | 0 |
| Zinc | 96,5 | 132,4 | 155,1 | 70,2 | 1 | 2 | 1 |
| Zirconio | 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | 3,52 | 0 | 0 | 35 |

Nota. En los datos de la tabla, se han considerado los metales que presentan valores



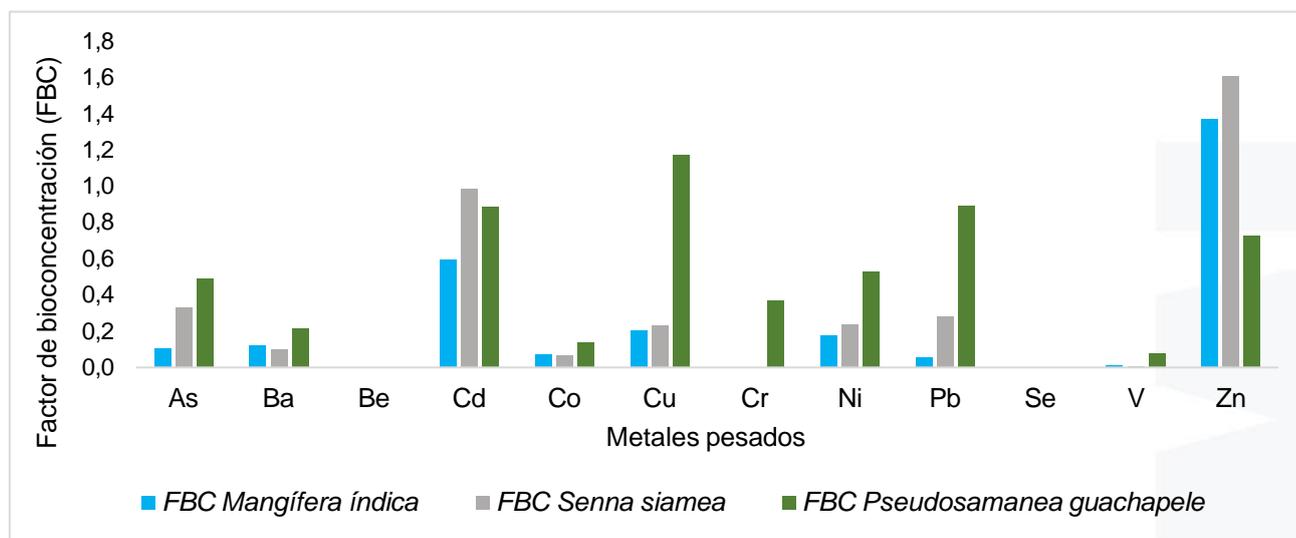
UNEMI

De los metales analizados en la tabla 5 mediante la técnica de ICP – MS para el análisis preliminar del suelo y especies vegetales, se han considerado únicamente a los metales que han arrojado valores desde 0,1 o < 0,1 en la representación de la tabla 8.

Por consiguiente, se logra enfatizar los resultados obtenidos en los metales pesados según el Factor de Bioconcentración (FBC) en las especies vegetales (figura 8).

Figura 8

Factor de bioconcentración de los metales pesados en las especies vegetales con la técnica de ICP-MS.



Nota. Descripción del análisis del As para generar la detección de hidruros (elaboración propia a partir de ANAVANLAB, 2024).

De tal manera, se destaca el poder de bioconcentración de la especie nativa *Pseudosamanea guachapele* con los metales pesados de mayor relevancia (As, Cd, y Pb) por los efectos nocivos que ante la investigación de múltiples trabajos los definen como metales que no cumplen ninguna función biológica en las plantas, ya que son tóxicos incluso en concentraciones bajas. Sin embargo, debido a sus características físico-químicas similares a las de otros metales esenciales, las plantas los absorben a través de los mismos canales, lo que provoca interferencias en la absorción, transporte y uso de diversos macro y microelementos (Quintana et al., 2024). El análisis de las muestras de suelo y de las especies vegetales mediante la técnica ICP-MS ha sido significativa para el diagnóstico preliminar del sitio de muestreo, debido a que, ha permitido detectar y cuantificar con alta precisión y sensibilidad la concentración de los metales pesados y otros elementos traza posibles para la medición del FBC en los ejemplares propios del lugar.

4.1.2 Concentraciones de As, Cd y Pb en *P. guachapele* y suelo mediante la técnica EAA – Llama.

Para cuantificar las concentraciones promedio de Cd, As y Pb en suelos y raíces (*Pseudosamanea guachapele*) recolectados en las localidades seleccionadas se ha empleado la técnica de espectroscopía de absorción atómica de Llama (EAA Llama) que ha proporcionado los siguientes resultados. Adicionalmente, se ha realizado el cálculo del factor de Bioconcentración (FBC) para el análisis de los metales pesados sujetos a investigación en cada localidad de muestreo, obteniendo los resultados de la tabla 9.

Tabla 9

Análisis de las muestras en suelo y P. guachapele mediante la técnica EAA Llama.

| Localidad | N° | Muestra | As P.g | Cd P.g | Pb P.g | Muestra | As s | Cd s | Pb s | FBC As | FBC Cd | FBC Pb |
|------------------|----|----------------------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| U.G | C1 | <i>P. guachapele</i> | 0 | 0 | 0 | Suelo | 0,8 | 1,2 | 9,9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| U.G | C2 | <i>P. guachapele</i> | 0 | 0 | 0 | Suelo | 1 | 2,1 | 13,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| U.G | C3 | <i>P. guachapele</i> | 0 | 0 | 0 | Suelo | 0,2 | 1,9 | 13,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| R. Amarillo | 1 | <i>P. guachapele</i> | 8,8 | 0,3 | 19,1 | Suelo | 22,6 | 1,6 | 41,1 | 0,4 | 0,2 | 0,5 |
| R. Amarillo | 2 | <i>P. guachapele</i> | 6,7 | 0,2 | 10,1 | Suelo | 20,2 | 1,5 | 43,2 | 0,3 | 0,1 | 0,2 |
| R. Amarillo | 3 | <i>P. guachapele</i> | 15,2 | 0,4 | 23,2 | Suelo | 29,2 | 1,8 | 48,6 | 0,5 | 0,2 | 0,5 |
| La Tembladera | 1 | <i>P. guachapele</i> | 1 | 0,1 | 8,7 | Suelo | 16,2 | 1,5 | 43 | 0,1 | 0,1 | 0,2 |
| La Tembladera | 2 | <i>P. guachapele</i> | 0,7 | 0 | 8,6 | Suelo | 13,1 | 1,6 | 38,4 | 0,1 | 0,0 | 0,2 |
| La Tembladera | 3 | <i>P. guachapele</i> | 0,7 | 0,2 | 1 | Suelo | 11,2 | 2 | 33,2 | 0,1 | 0,1 | 0,0 |
| C. Blanco | 1 | <i>P. guachapele</i> | 1,8 | 0,1 | 10,2 | Suelo | 2 | 1,5 | 24,4 | 0,9 | 0,1 | 0,4 |
| C. Blanco | 2 | <i>P. guachapele</i> | 0,7 | 0,2 | 9,1 | Suelo | 1,6 | 1,5 | 24,3 | 0,4 | 0,1 | 0,4 |
| C. Blanco | 3 | <i>P. guachapele</i> | 0,7 | 0,1 | 9,5 | Suelo | 1,8 | 1,4 | 22,4 | 0,4 | 0,1 | 0,4 |

Nota. La presente tabla muestra los datos obtenidos para As, Cd y Pb en las muestras de control (C1, C2 y C3) y los sitios de muestreos mediante el análisis de la técnica EAA – Llama en suelo y *P. guachapele* para la obtención del Factor de Bioconcentración.

Elaborado por: León, 2024

En concordancia con el estudio de Cuenca y Pilco (2020) realizado en el cultivo de *Carica papaya* y del agua de riego se manifiesta que el nivel de Pb es uno de los metales pesados más elevados por encima del arsénico y cadmio encontrados en especies vegetales como resultado identificado para el Oro (Río Amarillo – Portovelo) debido a la acción de las plantas de beneficio mineras de la zona.

4.1.2.1 Análisis estadístico del arsénico (As) en *P. guachapele* y el suelo.

Con respecto al análisis estadístico de los metales pesados considerados en la investigación, en primer lugar, se ha comprobado si los datos presentan una normalidad para el estudio. De tal manera, se procedió a colocar los datos del As procedentes de las raíces de la especie *P. guachapele* en el programa Past 4 y a realizar la prueba de la distribución normal de Shapiro-Wilk obteniendo como resultado la p (normal) de 0,0005316.

Lo que significa que, si el valor p es menor que 0,05, se rechaza la hipótesis nula de normalidad, es decir, los datos para las muestras de arsénico en la muestra vegetal de *Pseudosamanea guachapele* no presentan normalidad.

Por tal motivo, se ha procedido a realizar la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para la igualdad de las medianas, obteniendo el H (χ^2): 9,359 y p: 0,02097 con la finalidad de luego realizar el test Dunn's post hoc y determinar cuáles son los grupos específicos diferentes entre sí (ver figura 9).

Figura 9

Test de Dunn's post hoc de As en los diferentes sitios de muestreo para P. guachapele.

| | U.G | R. Amarillo | La Tembladera | C. Blanco |
|---------------|----------|-------------|---------------|-----------|
| U.G | | 0,001823 | 0,1333 | 0,106 |
| R. Amarillo | 0,001823 | | 0,106 | 0,1333 |
| La Tembladera | 0,1333 | 0,106 | | 0,9081 |
| C. Blanco | 0,106 | 0,1333 | 0,9081 | |

Nota. Se dan a conocer las diferencias significativas entre Río Amarillo (Portovelo) y U.G (Universidad de Guayaquil – Facultad de C. Naturales). **Elaborado por:** León, 2024

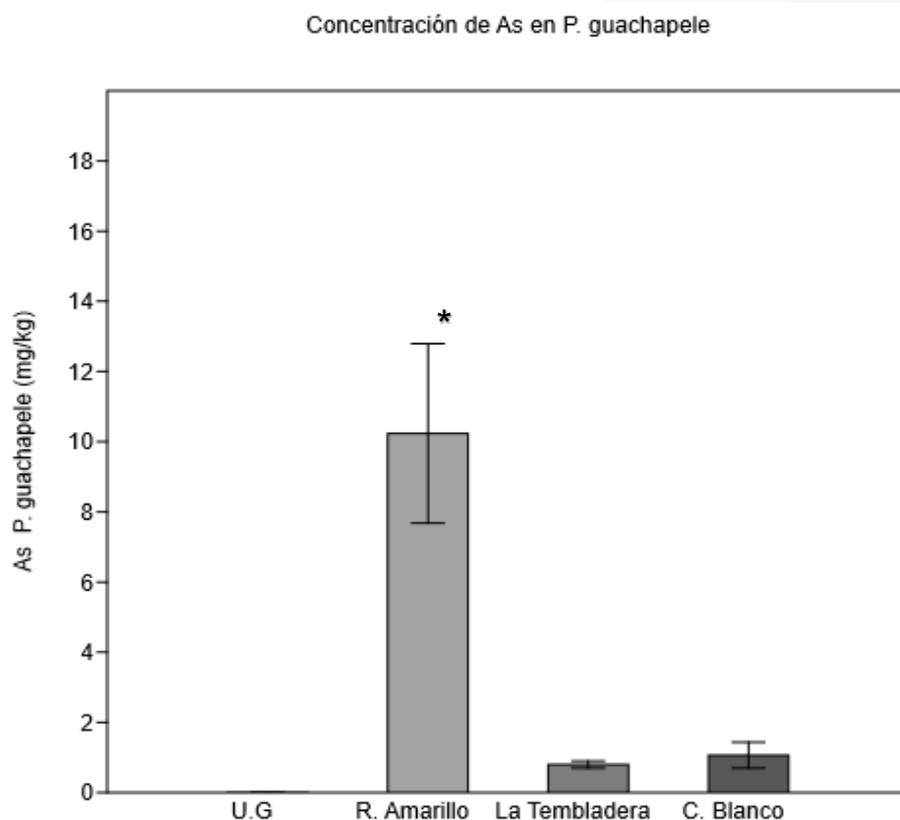
Las diferencias significativas se presentan entre las muestras de control (U.G) y R. Amarillo, con un valor $p= 0,001823$. Este valor es menor que 0,05, lo que indica una diferencia



UNEMI

Figura 10

Concentración de As en *P. guachapele* (mg/kg) según las localidades de estudio.



Nota. El presente gráfico muestra las concentraciones del As en *P. guachapele* correspondientes a las localidades de estudio. (*) Indica las diferencias significativas según Kruskal-Wallis y el test a posteriori de Dunn's ($P < 0.05$). **Elaborado por:** León,

Con base a la concentración de As en la especie *P. guachapele* se logra interpretar que el sitio con la concentración más alta de As, con un valor aproximado de 10 mg/kg es el de Río Amarillo (el Oro – Portovelo). Las barras de error estándar (EE) son las más largas en concentración de As en este lugar. La barra de error estándar sugiere que la concentración podría estar entre el rango de 8 - 13 mg/kg.

En referencia a la tabla 9, el As es el segundo metal pesado, después del Pb más significativo de los datos obtenidos, siendo la localidad de Río Amarillo (el Oro) la zona más expuesta a este metal identificada en *P. guachapele*. Tal como lo manifiestan Oliveira et al (2020) los materiales de origen vegetal tienen una capacidad de unión estática al metal presente en el efluente, esto debido a la presencia de lignocelulosa vital en el proceso de biosorción de metales pesados.

concentración de As en este lugar. La barra de error estándar sugiere que la concentración podría estar entre el rango de 8 - 13 mg/kg.

En referencia a la tabla 9, el As es el segundo metal pesado, después del Pb más significativo de los datos obtenidos, siendo la localidad de Río Amarillo (el Oro) la zona más expuesta a este metal identificada en P. guachapele. Tal como lo manifiestan Oliveira et al (2020) los materiales de origen vegetal tienen una capacidad de unión estática al metal presente en el efluente, esto debido a la presencia de lignocelulosa vital en el proceso de biosorción de metales pesados.

Asimismo, se realizó la prueba de la distribución normal de Shapiro-Wilk para el As en el suelo obteniendo como resultado la p (normal) de 0,04178. Lo que significa que, si el valor p es menor que 0,05, se rechaza la hipótesis nula de normalidad, es decir, los datos para las muestras de As en el suelo no presentan normalidad tampoco.

Por consiguiente, se ha procedido a realizar la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para la igualdad de las medianas, obteniendo el H (chi²): 10,38 y p: 0,01556. Posteriormente se realizó el test Dunn's post hoc y se determinaron los grupos que presentan diferentes entre sí (ver figura 11).

Figura 11

Test de Dunn's en As para los diferentes sitios de muestreo para el suelo.

| | U.G | R. Amarillo | La Tembladera | C. Blanco |
|---------------|----------|-------------|---------------|-----------|
| U.G | | 0,002235 | 0,04154 | 0,3082 |
| R. Amarillo | 0,002235 | | 0,3082 | 0,04154 |
| La Tembladera | 0,04154 | 0,3082 | | 0,3082 |
| C. Blanco | 0,3082 | 0,04154 | 0,3082 | |

Nota. Se dan a conocer las diferencias significativas entre los sitios de muestreos en las muestras de análisis para el suelo de As. **Elaborado por:** León, 2024

Las diferencias significativas se presentan entre las muestras de control (U.G) y R. Amarillo, con un valor $p= 0,002235$. Este valor p es menor que 0,05, lo que indica que la diferencia entre las concentraciones de As entre ambos lugares es significativa.

También existe diferencia significativa entre U.G y La Tembladera “Humedal – el Oro”. El valor $p= 0,04154$, el cual también es menor que 0,05, lo que indica una diferencia entre los niveles de arsénico en estos sitios de muestreo antes mencionados.

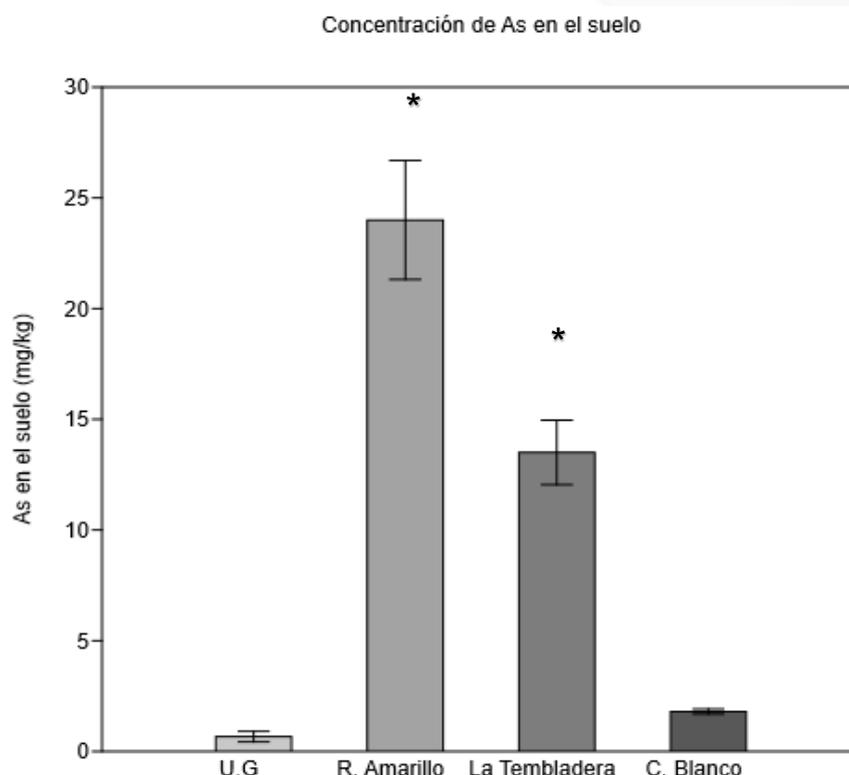
Estudios como el de Vilela (2021) manifiestan que el relleno sanitario del cantón Santa Rosa, el Oro, otorga una gran parte de lixiviados contaminantes que en conjunto con la ubicación cercana al humedal la “Tembladera”; cerca de la vía Santa Rosa – Arenillas, pueden ocasionar una contaminación del cuerpo hídrico de metales pesados como el As. De tal manera, la proximidad entre el relleno sanitario y el humedal “La Tembladera” aumenta el riesgo de que los lixiviados lleguen al humedal y otros cuerpos de agua cercanos.

entre los niveles de arsénico en estos sitios de muestreo antes mencionados.

Estudios como el de Vilela (2021) manifiestan que el relleno sanitario del cantón Santa Rosa, el Oro, otorga una gran parte de lixiviados contaminantes que en conjunto con la ubicación cercana al humedal la “Tembladera”; cerca de la vía Santa Rosa – Arenillas, pueden ocasionar una contaminación del cuerpo hídrico de metales pesados como el As. De tal manera, la proximidad entre el relleno sanitario y el humedal “La Tembladera” aumenta el riesgo de que los lixiviados lleguen al humedal y otros cuerpos de agua cercanos.

Figura 12

Concentración de As en el suelo (mg/kg) según las localidades de estudio.



Nota. El presente gráfico presenta las concentraciones del As en las muestras del suelo correspondientes a las localidades de estudio. (*) Indican las diferencias significativas según Kruskal-Wallis y el test a posteriori de Dunn's ($P < 0.05$). **Elaborado por:** León, 2024

En referencia, la localidad del R. Amarillo (el Oro) se destaca la mayor concentración de As cercana a los 25 mg/kg, significativamente mayor que los otros sitios, lo que sugiere un nivel de contaminación potencialmente alto. Las barras de error son más grandes, lo que indica una mayor variabilidad en las mediciones.

Por otro lado, la localidad de "La Tembladera" (el Oro) también muestra una concentración de arsénico relativamente alta, alrededor de 15 mg/kg, pero es considerablemente menor que R. Amarillo, con un nivel moderado de variabilidad (barras de error).

Tanto U.G. como C. Blanco presentan concentraciones de As muy bajas: UG cerca de 0 mg/kg y C. Blanco cerca de 1.5 mg/kg, con poca o nula contaminación en estas áreas, como lo reflejan sus pequeñas barras de error.

variabilidad en los datos, como lo reflejan sus pequeñas barras de error. Lo que sugiere poca o nula contaminación en estas áreas.

4.1.2.2 Análisis estadístico del cadmio (Cd) en *P. guachapele* y el suelo.

Para el análisis del Cd en la especie *P. guachapele*, se ha realizado la prueba de la distribución normal de Shapiro-Wilk obteniendo como resultado la p (normal) de 0,1511. Es decir, un valor p alto (mayor que 0,05) lo cual indica que no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula, lo que sugiere que los datos pueden seguir una distribución normal.

De tal manera, los datos fueron sujetos a la prueba de ANOVA de una vía, dando como resultado $F = 8$ y $p = 0,008596$. Un valor F más alto indica una mayor diferencia relativa entre los grupos en comparación con la variabilidad dentro de los grupos. En este caso, un valor F de 8 sugiere que las diferencias entre los grupos son bastante grandes en relación con la variabilidad interna. Con respecto al p dado a que el valor es menor que 0,05, es estadísticamente significativo. Esto significa que es muy improbable que las medias de los grupos sean iguales, por lo que se rechaza la hipótesis nula de que las medias de los grupos son iguales.

Con respecto a las varianzas, la prueba de Levene a partir de las medias ha sido de 0,2469 lo que indica que, el valor al ser mayor de 0,05 no se rechaza la hipótesis nula. Es decir, las variaciones entre los grupos evaluados son homogéneas (igualdad de varianzas).

Por consiguiente, se realizó la prueba Tukey Post – hoc cuyos resultados se comparten en la figura 13, que determinan con un valor $p = 0,005839$ diferencias significativas entre los grupos U.G y R. Amarillo. Esto indica que los dos grupos son diferentes entre sí ante la presencia del Cd en *P. guachapele*. También, existe una diferencia significativa entre R. Amarillo y La Tembladera. Aunque el valor $p = 0,04966$ es cercano al umbral de 0,05, sigue siendo significativo, lo que indica que estos grupos también difieren entre sí.

Figura 13

Test de Tukey's del Cd presente en los diferentes sitios de muestreo para P. guachapele.

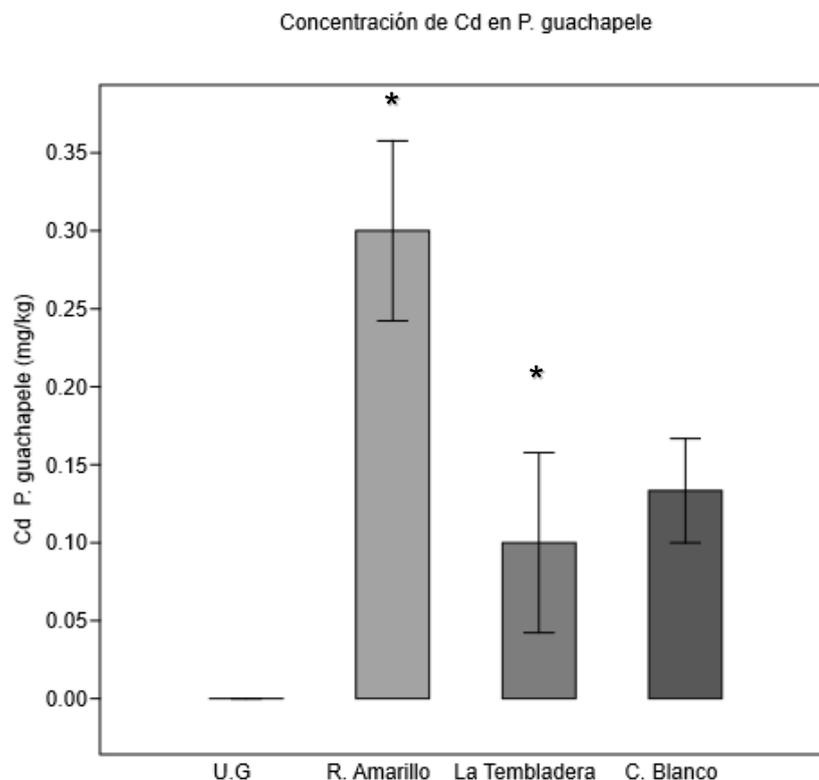
Nota. Se comparten las diferencias significativas entre los sitios de muestreos en el análisis del Cd para *P. guachapele*. **Elaborado por:** León, 2024

| | U.G | R. Amarillo | La Tembladera | C. Blanco |
|---------------|-------|-------------|---------------|-----------|
| U.G | | 0,005839 | 0,4283 | 0,2203 |
| R. Amarillo | 6,803 | | 0,04966 | 0,1056 |
| La Tembladera | 2,268 | 4,536 | | 0,9481 |
| C. Blanco | 3,024 | 3,78 | 0,7559 | |

Nota. Se comparten las diferencias significativas entre los sitios de muestreos en el análisis del Cd para *P. guachapele*. **Elaborado por:** León, 2024

Figura 14

Concentración de Cd en *P. guachapele* (mg/kg) según las localidades de estudio.



Nota. El presente gráfico presenta las concentraciones del Cd en las muestras de la especie *P. guachapele* correspondientes a las localidades de estudio. (*) Indican las diferencias significativas según la prueba Levene y el test a posteriori de Tukey's ($P < 0.05$). **Elaborado por:** León, 2024

Como se observa en la tabla de Tukey compartida previamente, existen diferencias estadísticamente significativas entre R. Amarillo y UG, y también entre R. Amarillo y La Tembladera. Estas diferencias pueden explicarse por las diferencias en las concentraciones de Cd que se observan en la figura 14.

La barra correspondiente a UG muestra una concentración de Cd prácticamente nula. Por otro lado, en R. Amarillo la concentración de Cd es la más alta en comparación con las demás, con una media cercana a 0.30 mg/kg. Las barras de error indican la variabilidad significativamente mayor que en los otros lugares. Este resultado coincide con la prueba de Tukey mostrada anteriormente, que indica diferencias significativas entre R. Amarillo y otros sitios.

significativamente mayor que en los otros lugares. Este resultado coincide con la prueba de Tukey mostrada anteriormente, que indica diferencias significativas entre R. Amarillo y otros sitios.

Con respecto a la concentración de Cd en La Tembladera es más baja que en R. Amarillo, con un valor promedio cercano a 0.10 mg/kg, las barras de error indican cierta variabilidad. En C. Blanco, la concentración de Cd es algo superior a la de La Tembladera, con una media cercana a 0.15 mg/kg. Las barras de error son más amplias, lo que sugiere una mayor variabilidad en las mediciones.

En conclusión, se confirma que el sitio R. Amarillo presenta la concentración más alta de cadmio en *P. guachapele*, y esta diferencia es estadísticamente significativa en comparación con otros sitios. En los demás sitios (UG, La Tembladera y C. Blanco), las concentraciones de cadmio son menores y no muestran diferencias significativas entre sí. Esto sugiere que R. Amarillo podría estar expuesto a mayores fuentes de contaminación por Cd que los demás sitios.

Para el análisis del Cd en el suelo, se ha procedido a realizar la prueba de la distribución normal de Shapiro-Wilk obteniendo como resultado la p (normal) de 0,4189. Es decir, un valor p alto (mayor que 0,05) lo cual indica que no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula, lo que sugiere que los datos pueden seguir una distribución normal.

De tal manera, los datos fueron sujetos a la prueba de ANOVA de una vía, pero la prueba de Levene ha demostrado que las varianzas no son iguales, es decir, hay una heterogeneidad ($p = 0,04068$) por lo que se han empleado los datos del Test de Welch, obteniendo los siguientes resultados: $F = 1,404$ y $p = 0,3719$. Estos resultados indican que las diferencias entre las medias de los grupos no son estadísticamente significativas lo que se comprueba con los resultados obtenidos por la prueba Tukey Post – hoc que se comparten en la figura 15.

Figura 15

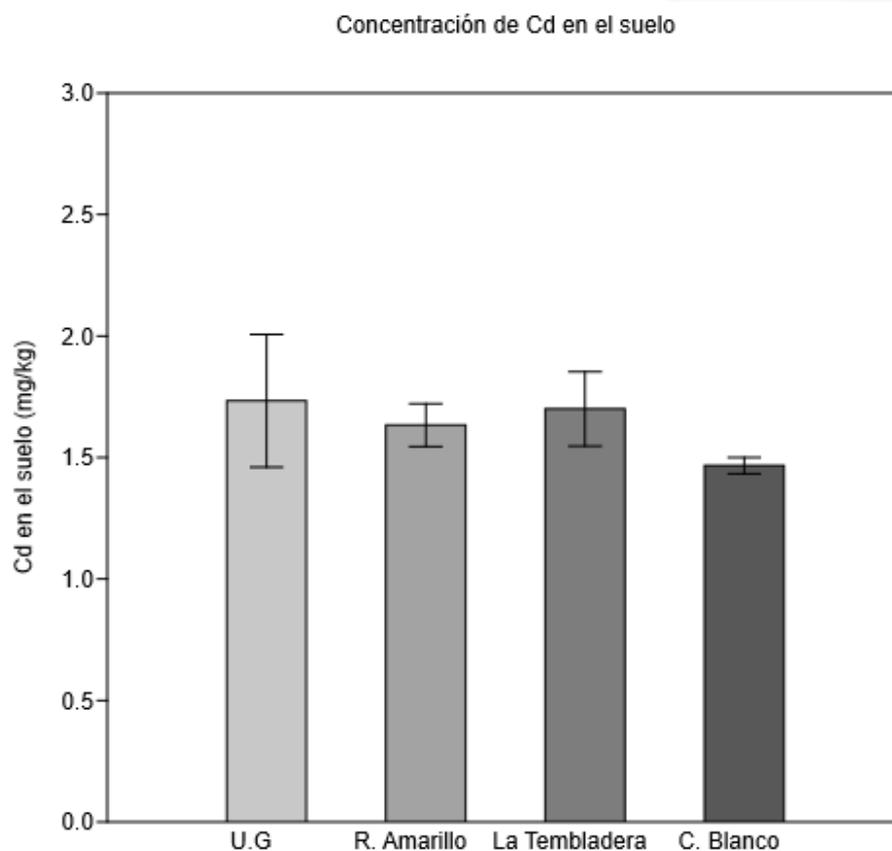
Test de Tukey's del Cd presente en los diferentes sitios de muestreo para el suelo.

| | U.G | R. Amarillo | La Tembladera | C. Blanco |
|---------------|--------|-------------|---------------|-----------|
| U.G | | 0,9711 | 0,9988 | 0,669 |
| R. Amarillo | 0,6124 | | 0,991 | 0,8858 |
| La Tembladera | 0,2041 | 0,4082 | | 0,7483 |
| C. Blanco | 1,633 | 1,021 | 1,429 | |

Nota. Se comparten los resultados que demuestran que las diferencias entre las medias de los grupos no son significativas entre los sitios de muestreos para el análisis del Cd en las muestras del suelo. **Elaborado por:** León, 2024

Figura 16

Concentración de Cd en el suelo (mg/kg) según las localidades de estudio.



Nota. El presente gráfico presenta las concentraciones del Cd en las muestras del suelo correspondientes a las localidades de estudio. **Elaborado por:** León, 2024

Los valores de concentración de Cd oscilan entre aproximadamente entre los rangos de 1.5 - 2.0 mg/kg. Aunque hay ligeras diferencias en las medias de concentración entre las ubicaciones, todas están en rangos relativamente cercanos.

En efecto, las barras de error no parecen ser muy grandes, lo que sugiere que las mediciones tienen una variabilidad moderada, pero no parece haber una diferencia estadísticamente significativa en las concentraciones de Cd entre los diferentes sitios.

La superposición indica que las diferencias observadas podrían deberse al azar más que

Por consiguiente, los resultados de la gráfica indican que las concentraciones de Cd en el suelo son bastante similares entre las diferentes ubicaciones, y las barras de error sugieren que no hay diferencias estadísticamente significativas entre ellas.

Por consiguiente, los resultados de la gráfica indican que las concentraciones de Cd en el suelo son bastante similares entre las diferentes ubicaciones, y las barras de error sugieren que no hay diferencias estadísticamente significativas entre ellas.

4.1.2.3 Análisis estadístico del plomo (Pb) en *P. guachapele* y el suelo.

En relación con los datos del Pb, se ha realizado la prueba de la distribución normal de Shapiro-Wilk obteniendo como resultado la p (normal) de 0,04811. Lo cual indica que, si el valor p es menor que 0,05, se rechaza la hipótesis nula de normalidad, a pesar de que el resultado es muy cercano a 0,05, los datos para las muestras de plomo en la muestra vegetal de *Pseudosamanea guachapele* no presentan normalidad.

Por tal motivo, se ha procedido a realizar la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para la igualdad de las medianas, obteniendo el H (chi²): 9,141 y p: 0,02668 con la finalidad de luego realizar el test Dunn's post hoc y determinar cuáles son los grupos específicos diferentes entre sí que se comparten en la figura 17.

Figura 17

Test de Dunn's de Pb en los diferentes sitios de muestreo en P. guachapele.

| | U.G | R. Amarillo | La Tembladera | C. Blanco |
|---------------|----------|-------------|---------------|-----------|
| U.G | | 0,007581 | 0,6495 | 0,06082 |
| R. Amarillo | 0,007581 | | 0,02671 | 0,4264 |
| La Tembladera | 0,6495 | 0,02671 | | 0,1555 |
| C. Blanco | 0,06082 | 0,4264 | 0,1555 | |

Nota. Se comparten las diferencias significativas entre U.G (Guayas) y Río Amarillo (Portovelo), U.G (Guayas) y La Tembladera (el Oro) y entre R. Amarillo y La Tembladera.

Elaborado por: León, 2024

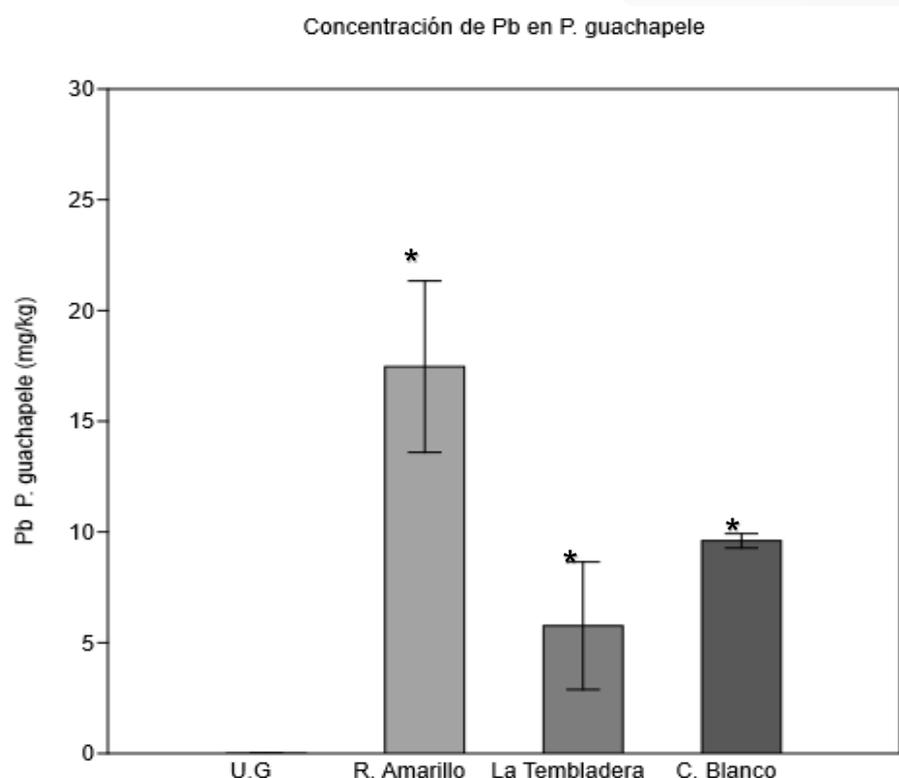
En cuanto a las diferencias significativas de mayor a menor se cita a la localidad de U.G (muestras de control – Guayas) y el humedal “La Tembladera” (Sta. Rosa – el Oro) cuyo valor es de 0,6495 e indica una diferencia mucho más grande, sugiriendo que hay más variación entre estos.

A continuación, se encuentran diferencias significativas entre el Río Amarillo (el Oro – Portovelo) y Cerro Blanco (Guayas) cuyo valor es de 0,4264, relativamente grande, lo que puede indicar una diferencia importante entre estos dos grupos. Finalmente, entre la U.G (Universidad de Guayaquil – Facultad de Ciencias Naturales) y Río Amarillo cuyo valor es de 0,007581 lo cual sugiere una diferencia pequeña entre estos dos grupos.

Estas diferencias reflejan las distintas condiciones ambientales y/o la variabilidad en los factores que se han evaluado en cada una de estas localidades, siendo el humedal "La Tembladera" y la U.G los sitios más contrastantes en este estudio.

Figura 18

Concentración de Pb en *P. guachapele* (mg/kg) según las localidades de estudio.



Nota. El presente gráfico presenta las concentraciones del Pb en las muestras de la especie *P. guachapele* correspondientes a las localidades de estudio. (*) Indican las diferencias significativas según Kruskal-Wallis y el test a posteriori de Dunn's ($P < 0.05$).

Elaborado por: León, 2024

Con respecto a los resultados obtenidos de la concentración del Pb en *Pseudosamanea guachapele* en las diferentes localidades de estudio se destaca en Río Amarillo la mayor concentración de Pb entre los rangos de 18 - 20 mg/kg, con una variabilidad considerable,

A continuación, Cerro Blanco sigue con una concentración cercana a los 10 mg/kg, con barras de error más pequeñas, lo que indica que la variabilidad entre las mediciones es menor en comparación con R. Amarillo. Aunque presenta niveles menores de plomo, sigue siendo significativa en comparación con las otras localidades. Para finalizar, La Tembladera muestra la menor concentración de plomo, alrededor de 5 mg/kg, y las barras de error indican una variabilidad moderada, aunque es evidente que este sitio tiene los niveles de plomo más bajos entre los cuatro lugares.

A continuación, Cerro Blanco sigue con una concentración cercana a los 10 mg/kg, con barras de error más pequeñas, lo que indica que la variabilidad entre las mediciones es menor en comparación con R. Amarillo. Aunque presenta niveles menores de plomo, sigue siendo significativa en comparación con las otras localidades. Para finalizar, La Tembladera muestra la menor concentración de plomo, alrededor de 5 mg/kg, y las barras de error indican una variabilidad moderada, aunque es evidente que este sitio tiene los niveles de plomo más bajos entre los cuatro lugares.

Del mismo modo, se ha analizado los resultados del suelo mediante la prueba de la distribución normal de Shapiro-Wilk obteniendo como resultado la p (normal) de 0,3047. Es decir, un valor p alto (mayor que 0,05) lo cual indica que no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula, lo que sugiere que los datos pueden seguir una distribución normal.

De tal manera, los datos fueron sujetos a la prueba de ANOVA de una vía, dando como resultado $F = 55,96$ y $p = 0,2989$. Un valor F más alto indica una mayor diferencia relativa entre los grupos en comparación con la variabilidad dentro de los grupos, lo que sugiere que podría haber diferencias notables entre estos. En este caso, el valor p de 0,2989 es mucho mayor que 0,05, lo que indica que no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula. Esto significa que, aunque el valor F es alto, las diferencias entre los grupos no son estadísticamente significativas con los datos observados.

De tal manera, los datos fueron sujetos a la prueba de ANOVA de una vía, mediante la prueba de Levene con un valor de $p = 0,2989$ lo que indica que las varianzas entre los grupos no son significativamente diferentes, es decir, hay homogeneidad de varianzas. A continuación, se comparten los resultados de la prueba de Tukey con la finalidad de identificar las diferencias significativas entre los resultados obtenidos de las localidades en estudio compartidas en la figura 19.

Figura 19

Test de Tukey's del Pb presente en los diferentes sitios de muestreo para el suelo.

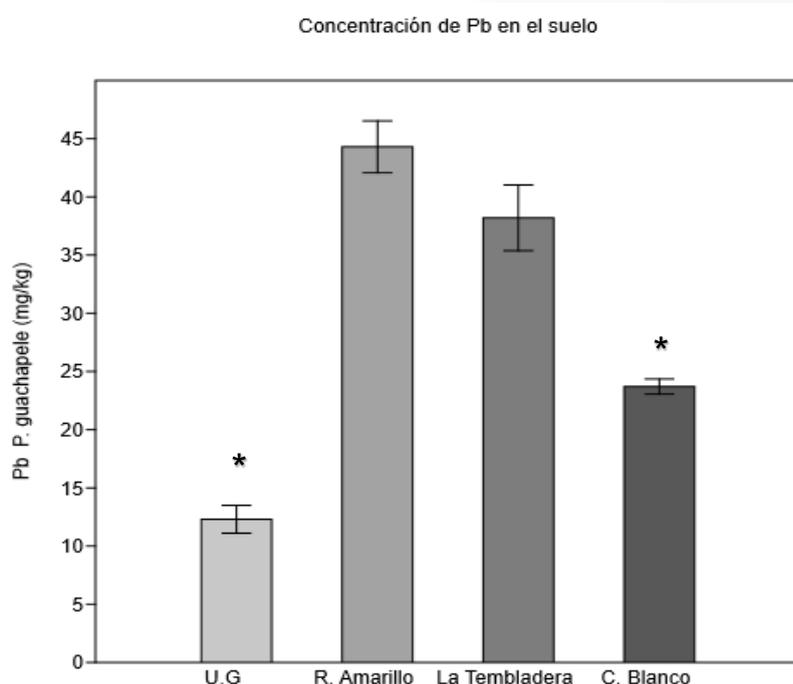
| | U.G | R. Amarillo | La Tembladera | C. Blanco |
|----------------------|------------|--------------------|----------------------|------------------|
| U.G | | 1,192E-05 | 5,787E-05 | 0,01309 |
| R. Amarillo | 16,6 | | 0,1929 | 0,0003019 |
| La Tembladera | 13,43 | 3,164 | | 0,003159 |
| C. Blanco | 5,913 | 10,68 | 7,52 | |

Nota. Se comparten las diferencias significativas entre U.G (Guayas) y el resto de las localidades compartidas, pero se descartan estas diferencias entre R. Amarillo y Cerro Blanco. **Elaborado por:** León, 2024

Se distinguen diferencias significativas entre U.G (Guayas) y las otras localidades de estudio (R. Amarillo y La Tembladera) así como entre Cerro Blanco y varios de los otros grupos, ya que el valor p es mucho menor que 0,05. Mientras que, entre R. Amarillo y La Tembladera, el valor p es mayor que 0,05 (0,1929), lo que indica que no hay significancia.

Figura 20

Concentración de Pb en el suelo (mg/kg) según las localidades de estudio.



Nota. El presente gráfico presenta las concentraciones de Pb en las muestras del suelo en las localidades de estudio. (*) Indican las diferencias significativas según la prueba Levene y el test a posteriori de Tukey's ($P < 0.05$) **Elaborado por:** León, 2024

Con relación a los resultados obtenidos, el Río Amarillo presenta la mayor concentración de Pb en el suelo, alrededor de 45 mg/kg, con barras de error relativamente pequeñas, lo que indica que las mediciones fueron consistentes y hay poca variabilidad.

Así también, la localidad de La Tembladera sigue con una concentración de Pb cercana a 35 mg/kg, también con barras de error pequeñas, lo que sugiere una alta concentración de Pb en el suelo y poca variabilidad en las mediciones.

Así mismo, la localidad de Cerro Blanco muestra una concentración cercana a 25 mg/kg, con una variabilidad igualmente baja, lo que indica que este sitio tiene menos Pb en comparación con Río Amarillo y La Tembladera, pero aún presenta niveles elevados.

Sin embargo, la U.G tiene la menor concentración de Pb en el suelo, alrededor de 10-15 mg/kg, con barras de error más pequeñas, lo que sugiere consistencia en las mediciones y un ambiente menos contaminado en términos de Pb en el suelo comparado con las otras localidades. La diferencia en las concentraciones de Pb entre las localidades sugiere que hay fuentes de contaminación específicas en las áreas más afectadas, y las barras de



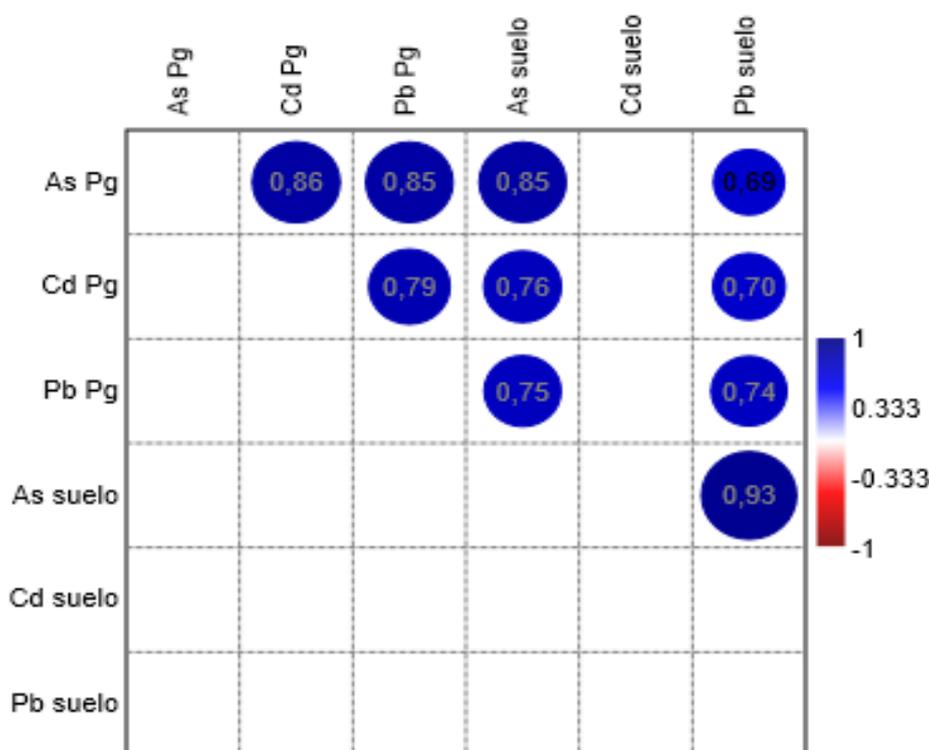
UNEMI

4.1.3 Correlación entre las concentraciones de Cd, As y Pb en *P. guachapele* y el suelo

Cumpliendo con la finalidad de evaluar la relación entre las concentraciones de los metales pesados del estudio en el suelo y su acumulación en las raíces de *Pseudosamanea guachapele* mediante la correlación de Spearman's ya que se trabaja con datos que no necesariamente siguen una distribución normal en su totalidad.

Figura 21

Correlación de los metales pesados en las muestras de P. guachapele y el suelo.



Nota. Correlación de Spearman's entre la concentración de metales en *P. guachapelí* y el suelo. **Elaborado por:** León, 2024

Con relación al análisis de los datos obtenidos, hay una fuerte correlación positiva entre las concentraciones de los metales pesados en el suelo y la planta, especialmente para el Pb, donde el coeficiente es muy alto (0,93) debido a su aproximación de 1, tales como, la correlación de 0,86, entre las concentraciones de As y Cd en la planta *Pseudosamanea guachapele*. Seguida de la correlación de 0,85 lo que también indica una fuerte relación entre la concentración de As y Pb en la planta.

Por otro lado, ante la correlación de 0,79, se sugiere que cuando aumenta el Cd en la planta, también aumenta el Pb, lo que refleja una relación positiva entre ellos. respectivamente. En

conclusión, hay fuertes correlaciones entre las concentraciones de los metales (As, Cd y Pb) dentro de la planta, lo que sugiere que cuando uno de estos metales aumenta en la planta, los otros tienden a hacerlo también.

De tal manera, se destaca una relación positiva significativa entre las concentraciones de Pb en el suelo y las raíces de *Pseudosamanea guachapele* ($r = 0,93$; $p < 0,05$), lo que confirma la capacidad de esta especie para reflejar la distribución espacial de la contaminación. Este patrón también se observará en el caso del Cd, aunque con correlaciones moderadas, indicando una acumulación selectiva influenciada por factores como la biodisponibilidad del metal y las características edáficas del suelo.

El gráfico de dispersión refuerza esta tendencia, ilustrando mayores niveles de acumulación en zonas cercanas a fuentes directas de contaminación, como descargas mineras y agrícolas. Estos hallazgos subrayan la utilidad de *Pseudosamanea guachapele* como bioindicador para identificar puntos críticos de contaminación y guiar estrategias de mitigación en áreas críticas.

CAPÍTULO V: Conclusiones, Discusión y Recomendaciones

5.1. Discusión

La investigación identificó con éxito la composición de metales pesados (Cd, As y Pb) en el suelo y en la especie *Pseudosamanea guachapele* en las localidades de el Oro sujetas al estudio. El uso de la Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP – MS) fue instrumental para reconocer la capacidad de bioconcentración de estos metales en la especie. Estudios como el de Cedrón y Velásquez (2020) destacan y concuerdan en la importancia de la bioacumulación de especies vegetales y animales como un proceso clave en el biomonitoreo ambiental al permitir que ciertas especies acumulen contaminantes en sus tejidos, lo que facilita el seguimiento de la calidad del ambiente a lo largo del tiempo.

El estudio determinó las concentraciones de Cd, As y Pb en las muestras de plantas de *Pseudosamanea guachapele* (raíces) y en el suelo mediante Espectroscopia de Absorción Atómica de Llama (EAA Llama). Los resultados mostraron concentraciones variables en diferentes puntos de muestreo, lo que refleja la heterogeneidad de la contaminación por metales pesados como el plomo y el cadmio en las áreas estudiadas. De acuerdo con el estudio realizado por Galvis y Fernández (2021) en el que se investiga la capacidad de bioacumulación de metales pesados en especies vegetales nativas de zonas contaminadas de Ecuador, se destaca el rol de *Pseudosamanea guachapele* en la absorción de contaminantes, como cadmio y plomo, en sus tejidos.

La investigación correlacionó las concentraciones de Cd, As y Pb en las raíces de la especie vegetal *Pseudosamanea guachapele* con las concentraciones en el suelo. Los hallazgos validaron la capacidad de esta especie como biomonitora. Lo cual concuerda con la investigación de Apreciado y Echeverry (2023) al identificar a la especie *Pseudosamanea guachapele* como potencial bioindicador en suelos contaminados con plomo y cadmio, confirmando su capacidad para bioacumular estos metales en sus raíces. Sus hallazgos refuerzan el uso de esta planta en programas de restauración ecológica y biomonitoreo de zonas altamente contaminadas.

Así también, estudios como el de Sáenz et al. (2023) identificaron la correlación entre prácticas agrícolas y minería con la presencia de Cd y Pb en humedales ecuatorianos, destacando impactos en la biodiversidad acuática, lo cual coincide con la presente investigación hacia el entorno del humedal “La Tembladera” y la relación con la provincia de el Oro ante los picos altos de concentración de los metales pesados investigados.

Se confirmó la hipótesis alternativa. Se encontró que la especie vegetal *Pseudosamanea guachapele* acumula metales pesados (Cd, As y Pb) en los tejidos de sus raíces en diferentes niveles, lo que refleja la contaminación ambiental en las provincias de Guayas y el Oro, Ecuador. Por consiguiente, se rechazó la hipótesis nula. La investigación demostró que *Pseudosamanea guachapele* acumula metales pesados (Cd, As y Pb) en los tejidos de sus raíces, lo que contradice la hipótesis nula. Lo cual coincide con el estudio de investigación de Ayodele y Oluseye (2022), debido a que, documentan el uso de *Albizia procera* para remediar suelos contaminados, proporcionando un modelo de comparación para *Pseudosamanea guachapele* en contextos similares.

El presente estudio confirmó la prevalencia y toxicidad de Cd, As y Pb en el ambiente de las zonas de estudio, especialmente en las que presentan mayor exposición a las zonas mineras de el Oro (Portovelo) y la capacidad de la especie de acumular estos metales en sus tejidos. En consonancia con el estudio de Labre et al. (2022) en el cual se examina la eficacia de diversas especies arbóreas en la bioacumulación de metales pesados, resaltando a *Pseudosamanea guachapele* por su alta capacidad para absorber contaminantes en áreas impactadas por la minería. Esto refuerza la relevancia de esta especie en los esfuerzos de biomonitorio y la importancia de abordar la contaminación por metales pesados en Ecuador.

Estudios como el de Reyes (2020) concuerdan con la presente investigación debido a que manifiesta que, la actividad agrícola e industrial intensiva, junto con el crecimiento urbano, ha incrementado los niveles de contaminación por metales pesados en Guayaquil y zonas aledañas, especialmente en áreas cercanas al estero Salado y el Bosque Protector Cerro Blanco. Estas áreas se enfrentan a la acumulación de metales como Cd, As y Pb debido a descargas industriales y el uso de pesticidas, generando una justificación ante la tendencia que se encuentra entre los sitios de muestreo y los resultados obtenidos.

5.2. Conclusiones

La investigación confirma la capacidad de *Pseudosamanea guachapele* para acumular metales pesados, particularmente Pb, en sus raíces, lo que la convierte en una especie bioindicadora eficaz. Los análisis realizados tanto en el suelo como en los tejidos de la planta revelaron concentraciones significativas de Cd, As y Pb, especialmente en áreas cercanas a actividades mineras e industriales. Esto la convierte en una herramienta eficaz para el monitoreo ambiental de estas sustancias, validando su potencial como bioindicador.

La metodología aplicada, que incluyó espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (ICP - MS) y espectrofotometría de absorción atómica de llama (EAA), permitió identificar diferencias significativas en las concentraciones de metales pesados entre los sitios de muestreo. Estos resultados subrayan la variabilidad en la contaminación y resaltan la importancia de realizar monitoreos continuos para mitigar los efectos de la contaminación. *Pseudosamanea guachapele* ofrece un enfoque de monitoreo ambiental eficiente, económico y ecológico.

Los análisis estadísticos, incluyendo el test de ANOVA y el test de Kruskal-Wallis, revelaron diferencias significativas entre las concentraciones de Cd, As y Pb en las distintas localidades de muestreo. Estos hallazgos son clave para identificar zonas con mayor riesgo ambiental y refuerzan la propuesta de implementar *Pseudosamanea guachapele* en programas de monitoreo ambiental debido a su capacidad de bioacumulación de estos metales tóxicos.

Se observó una correlación positiva significativa mediante la prueba Spearman entre las concentraciones de Pb ($r = 0,93$) sobre todo ante As y Cd en el suelo y las raíces de *Pseudosamanea guachapele*, lo que confirma la aceptación de la hipótesis alternativa en la acumulación de metales pesados (Cd, As y Pb) en los tejidos de sus raíces en diferentes niveles. Por consiguiente, se rechazó la hipótesis nula, lo que refuerza la propuesta de utilizar a esta especie en programas de biomonitoreo. La capacidad de la especie para reflejar la contaminación ambiental de manera precisa contribuye a la validación de su eficacia como bioindicador.

Uno de los principales aportes de este estudio es la propuesta de *Pseudosamanea guachapele* como una opción viable para la fitorremediación. Su capacidad de acumular metales pesados en sus tejidos abre la posibilidad de utilizar esta especie en programas de remediación ambiental, contribuyendo al monitoreo de la contaminación y su mitigación.

El uso de *Pseudosamanea guachapele* en las provincias de Guayas y el Oro, áreas con intensa actividad agrícola, industrial y minera, proporciona una herramienta eficaz para el monitoreo y la gestión ambiental. Las concentraciones elevadas de Cd, As y Pb detectadas en estas zonas sugieren la necesidad urgente de implementar medidas de control y reducción de la contaminación, basadas en los datos proporcionados por este tipo de estudios.

A nivel ecológico, el estudio destaca la importancia de preservar especies nativas como *Pseudosamanea guachapele*, que tienen valor como bioindicador y desempeñan un papel clave en la protección y recuperación de los ecosistemas locales. Su resistencia y capacidad de adaptación a diferentes condiciones climáticas la convierten en una especie fundamental para futuros programas de reforestación y restauración ambiental en áreas afectadas por la contaminación.

Se ha determinado que en los valores obtenidos para el análisis de las muestras de suelo en las zonas de estudio según el acuerdo ministerial 097A (Ministerio del Ambiente, 2015) el Pb supera en todos los lugares de muestreo el rango máximo que es de 19 mg/kg. Al igual que el Cd, cuya representación máxima en el suelo es de 0,5 mg/kg y en todas las localidades de estudio ha excedido. Con respecto al As, los valores en el suelo de las zonas de muestreo correspondientes a el Oro (Sta. Rosa y Portovelo) ascienden el rango máximo que es de 12 mg/kg.

En conclusión, esta investigación proporciona evidencia sólida sobre la viabilidad de *Pseudosamanea guachapele* como bioindicador de la contaminación por metales pesados en las provincias de Guayas y el Oro. El estudio aporta una mejora en la gestión ambiental, el uso de esta especie nativa contribuye a la protección del medio ambiente y facilita la implementación de estrategias sostenibles de mitigación de la contaminación en Ecuador.

5.3. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda investigar el potencial de otras especies vegetales nativas complementarias para crear sistemas de remediación multiespecies por medio del potencial que presentan como bioindicadores, con el propósito de generar la capacitación de equipos locales en técnicas de recolección y análisis de muestras usando métodos estandarizados como ICP-MS y AAS en proyectos biotecnológicos.

Los resultados indican que *Pseudosamanea guachapele* tiene potencial para ser utilizada como bioindicador en programas de monitoreos ambientales permanentes. Se sugiere que investigaciones futuras se dirijan además a la capacidad de descontaminar el suelo mediante el diseño de un cronograma de muestreo estacional (mínimo trimestral) para evaluar la variabilidad temporal de las concentraciones de contaminantes, lo cual representa un impacto significativo en las zonas afectadas por la actividad minera.

Una de las principales limitaciones del presente estudio fue la disponibilidad de sitios de muestreo representativos y la variabilidad en la capacidad de acumulación de metales entre los ejemplares de *Pseudosamanea guachapele*. Por ello, se recomienda desarrollar una base de datos georreferenciada accesible para almacenar y analizar los resultados del monitoreo en diferentes épocas del año, con el fin de obtener datos que permitan reducir la incertidumbre asociada a las variaciones climáticas y estacionales.

Dado que los resultados sugieren una correlación significativa entre la contaminación del suelo y la acumulación de metales pesados en *Pseudosamanea guachapele*, se recomienda utilizar los datos de este estudio para apoyar la creación de políticas públicas orientadas a la gestión y reducción de la contaminación por metales pesados, con la propuesta de límites máximos permisibles más estrictos para Cd, As y Pb en suelos agrícolas y áreas protegidas, en concordancia con estándares internacionales.

La inclusión de esta especie en programas de monitoreo ambiental puede facilitar la



UNEMI

zonas prioritarias de intervención basadas en los datos generados. Así como también, presentar los resultados obtenidos en congresos internacionales y publicarlos en revistas especializadas para fomentar el reconocimiento global del estudio que puede gestionar el fortalecimiento de redes de investigación y colaboración internacional para mejorar la educación y sensibilización comunitaria.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar Zelada, V. E. (2019). Percepción de la población sobre la actividad agropecuaria y minera en el centro poblado de Quengomayo-Sorochuco-Celendín. (Bachelor's thesis).
- Akintola, O., Abodunrin, E., Ademigbuji, A., Ibode, R. y Babatunde, O. (2022). Fitorremediación de elementos potencialmente tóxicos en suelos de vertederos mediante plántulas de *Albizia lebbek L. Benth. J.*
- American Heart Association. (2022). La exposición crónica a plomo, cadmio y arsénico incrementa el riesgo de enfermedades cardiovasculares. Newsroom. <https://newsroom.heart.org/news/la-exposicion-cronica-a-plomo-cadmio-y-arsenico-incrementa-el-riesgo-de-enfermedades-cardiovasculares>
- Apraez Ortiz, D. E. (2023). Estudio sobre la prevalencia de metales pesados cadmio (Cd) y plomo (Pb) en arroz (*Oriza sativa L.*). (Trabajo de titulación, Universidad Central del Ecuador).
- Apreciado, J., & Echeverry, L. (2023). Evaluación del potencial bioindicador de *Pseudosamanea guachapele* en la remediación de suelos contaminados por plomo y cadmio. *Revista de Ecología y Biotecnología*, 18(1), 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.revbioecol.2023.01.002>
- Azevedo, R., & Rodriguez, E. (2012). Phytotoxicity of Mercury in Plants: A Review. *Phytotoxicity*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/848614>
- Bersosa Vaca, E. F., & Ulloa Vaca, C. A. (2018). Utilización de Índices Evaluadores de la Calidad del Agua Basados en Bioindicadores en Ecuador. *Qualitas*, 15(15), 128–144.
- Calero Almeida, V. A. (2023). Paper review: Contaminación de metales pesados en el Ecuador un análisis químico ambiental toxicológico normativo y analítico. (Bachelor's thesis).
- Castillo Herrera, S. E. (2021). Determinación de metales pesados en el agua subterránea para uso en actividades productivas en la zona baja de la provincia El Oro.
- Cedrón, E., & Velásquez, K. (2022). Biomonitoring of trace elements Cd, Ni, Pb, Sb, and As in the metropolitan area of Huancayo - Peru, using *Tillandsia capillaris*

transplanted as a biomonitor (Bachelor's thesis). Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería Química.

- Cedrón, L., & Velásquez, J. (2022). Bioacumulación y su rol en el biomonitoreo ambiental: Una revisión integral. *Revista de Ciencias Ambientales*, 14(2), 115–132. <https://doi.org/10.1016/j.revamb.2022.02.005>
- Cepeda D., & Hernández, L. (2020). Propuesta de protocolo de incautación, transporte y almacenamiento de mercurio en cumplimiento de la Ley 1658 de 2013 para la DICAR. *Ingeniería Ambiental y Sanitaria*. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1859
- Chambi, L., Orsag, V., & Niura, A. (2017). Evaluación de la presencia de metales pesados en suelos agrícolas y cultivos en tres microcuencas del municipio Poopó en Bolivia. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 4(1), 67–73.
- Clemens, S., & Ma, J. (2016). Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods. *Annual Review of Plant Biology*, 67, 489–512. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043015-112301>
- Collin, S., Baskar, A., Geevarghese, M., Ali, M., Bahubali, P., Choudhary, R., ... & Swamiappan, S. (2022). Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects in plants: A review. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 3, 100064. <https://doi.org/10.1016/J.HAZL.2022.100064>
- Cornejo, X. (2015). Las especies emblemáticas de flora y fauna de la ciudad de Guayaquil y de la provincia del Guayas, Ecuador. *Revista Científica Ciencias Naturales y Ambientales*, 56–71.
- Coto, J. (2014). Estudios de bioacumulación de un metal de interés en contaminación ambiental (plomo) en larvas de lubina de gran valor comercial. Tesis de grado, Universidad de Cádiz. pp. 5. Recuperado el 10 de Marzo del 2021 de: <https://rodin.uca.es/handle/10498/17347>
- Echeverry, R. (2011). Plantas nativas en el jardín botánico Alejandro Von Humboldt de la Universidad de Tolima-Ibagué. Ibagué: Universidad de Tolima.
- European Commission. (2020). Cadmium in the environment. https://ec.europa.eu/environment/chemicals/cadmium_en.htm
- Falero Alvarado, Y. (2020). Determinación de metales pesados - arsénico, cadmio, mercurio y plomo - en banano orgánico producido en el distrito de Buenos Aires,

Valle Alto Piura – Morropón, Piura 2020. Obtenido de <https://repositorio.unp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12676/2795/IAIA-FAL-ALV2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Flora, S. (2023). Handbook of Arsenic Toxicology. Handbook of Arsenic. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-03211-1>
- Galvis Neira, D. A. (2021). Efecto y bioacumulación del cadmio en cuatro especies forestales (*Tabebuia rosea*, *Terminalia superba*, *Albizia guachapele*, *Cariniana pyriformis*) y nueve genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.).
- Galvis, N., & Fernández, M. (2021). Plant species as bioindicators of heavy metal contamination: Evaluating bioaccumulation capacity for environmental monitoring. *Environmental Pollution*, 284, 117161. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117161>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación (6ª ed.). McGraw-Hill / Interamericana Editores.
- Hernández, C., Ramírez, V., Martínez, J., Quintero, V., Baez, A., Munive, J., & Rosas, N. (2022). Los metales pesados en la historia de la humanidad: Los efectos de la contaminación por metales pesados y los procesos biotecnológicos para su eliminación. *AyTBUAP*, 7(27), 1–68.
- Labre, J., Conceição, P., da Cruz, M., & Breier, B. (2022). Superación de la dormición en semillas de la leguminosa árbol *Pseudosamanea guachapele* (Kunth) Harms. *GENTRYANA*, 1(1), e211–e211.
- Labre, L., Jiménez, F., & Soto, P. (2022). Bioacumulación de metales pesados en especies arbóreas: El caso de *Pseudosamanea guachapele* en Ecuador. *International Journal of Environmental Monitoring*, 7(4), 230-245. <https://doi.org/10.1016/j.ijem.2022.07.004>
- Lassiter, M., Owens, E., Patel, M., Kirrane, E., Madden, M., Richmond-Bryant, J., & Dubois, J. (2015). Cross-species coherence in effects and modes of action in support of causality determinations in the U.S. Environmental Protection Agency's Integrated Science Assessment for Lead. *Toxicology*, 330, 19–40.
- Londoño, F., Londoño, T., & Muñoz, G. (2016). Los Riesgos De Los Metales Pesados En La Salud Humana Y Animal. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153)

- Luna, F., Gómez, E., Tamariz, V., & Castelán, R. (2023). Bioindicadores como herramientas para la evaluación de la contaminación ambiental. *RD-ICUAP*, 9(25), 202-207. Recuperado a partir de <https://rd.buap.mx/ojs-dm/index.php/rdicuap/article/view/1059>
- Maldonado, A., Sánchez, C., Osorio, E., López, J., & Estrada, B. (2016). Bioremediation of hydraulic fracturing sludge - Biorremediación de lodos de fractura hidráulica. *Mexican Journal of Biotechnology*, 1(2), 29-47. <https://doi.org/10.29267/mxjb.2016.1.2.29>
- Martínez, D., Vibrans, H., Espinosa, F., Camacho, M., & de la Barrera, E. (2024). Malezas ruderales como biomonitores del depósito de nitrógeno urbano. *Ecosistemas*, 33(2), 2672. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2672>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2015, noviembre 4). Reforma al Libro IX del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente. Registro Oficial No. 387. <https://www.registroficial.gob.ec>
- Moreno, F., Soto, C., Rodríguez, D., Rodríguez, R., Nava, E., Valenzuela, W., & Lugo, E. (2021). Acumulación de metales pesados en plantas desarrolladas en el Norte de Sinaloa para propósitos de fitorremediación. *Latin American Journal of Applied Engineering*, 6(1), 1–8.
- Mousavi, S., Rahmanian, A., & Ahmadi, R. (2023). The Biological Monitoring as a Source of Information on the Pollution of Water, Soil, and Air in the City of Ahvaz. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2805484/v1>
- OMS. (Octubre de 2021). Intoxicación por plomo. Obtenido de <https://www.who.int/es/newsroom/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>
- Oviedo, R., Moina, E., Naranjo, J., & Barcos, M. (2017). Contaminación por metales pesados en el sur del Ecuador asociada a la actividad minera. *Bionatura*, 2, 437–441.
- Oyedeji, A y Oyedeji, F (2022). Evaluación del potencial fitorremediador de Albizia procera (Roxb.) Benth, una especie de planta leguminosa en la rehabilitación de suelos contaminados con petróleo crudo. *FUW Trends in Science & Technology Journal*, 7 (3), 48-54.
- Papuico, Z. (2019). Técnica de fitorremediación en la extracción de metales pesados con la planta Yaluzai (*Senecio rudbeckiaefolius*) en la relavera de Quiulacocha del distrito de Simón Bolívar de Rancas (Tesis de pregrado).

Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Facultad de Ingeniería, Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Ambiental.

- Parmar, K., Rawtani, D., & Agrawal, K. (2016). Bioindicators: The natural indicator of environmental pollution. *Frontiers in Life Science*, 9(2), 110–118. <https://doi.org/10.1080/21553769.2016.1162753>
- Pedroso, I. (2019). Parámetros magnéticos indicadores de contaminación por metales pesados en suelos de la cuenca almendares-vento. *Minería y Geología*, 35(1).
- Peñalver, A. (2018). Evaluación del efecto de tratamientos pre germinativos en semillas de Guachapelí (*Albizia guachapele*) en el cantón Guayaquil, provincia del Guayas. Obtenido de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/10207/1/T-UCSG-PRETEC-AGRO-132.pdf>
- Pernia, B., Cornejo, X., Mero, M., & Zambrano, J. (2019). ResearchGate. Recuperado el 2022, de 6 de julio de https://www.researchgate.net/publication/337424161_IMPACTOS_DE_LA_CON_TAMINACION_SOBRE_LOS_MANGLARES_DE_ECUADOR
- Pernía, B., Mero, M., Cornejo, X., Ramírez, N., Ramírez, L., Bravo, K., ... & Zambrano, J. (2018). Determinación de cadmio y plomo en agua, sedimento y organismos bioindicadores en el Estero Salado, Ecuador. *Enfoque UTE*, 9(2), 89–105. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n2.246>
- Prieto, J., González, C., Román, A., & Prieto, F. (2019). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, vol. 10, núm. 1, pp. 29-44
- Qu, W., Wang, C., Luo, M., Zheng, C., & Li, H. (2020). Distributions, quality assessments, and fluxes of heavy metals carried by submarine groundwater discharge in different types of wetlands in Jiaozhou Bay, China. *Marine Pollution Bulletin*, 157, 111310. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111310>
- Quintana, G., Crespo, A., Caiza, C., Decoro, G., Fox, L., & Bañol, C. (2024). Potencial bioacumulador de metales pesados para la fitorremediación como alternativa para la recuperación del paisaje forestal en un área de extracción minera, Napo, Ecuador. *Revista Cubana de Ciencias Forestales: CFORES*, 12(1), 8.

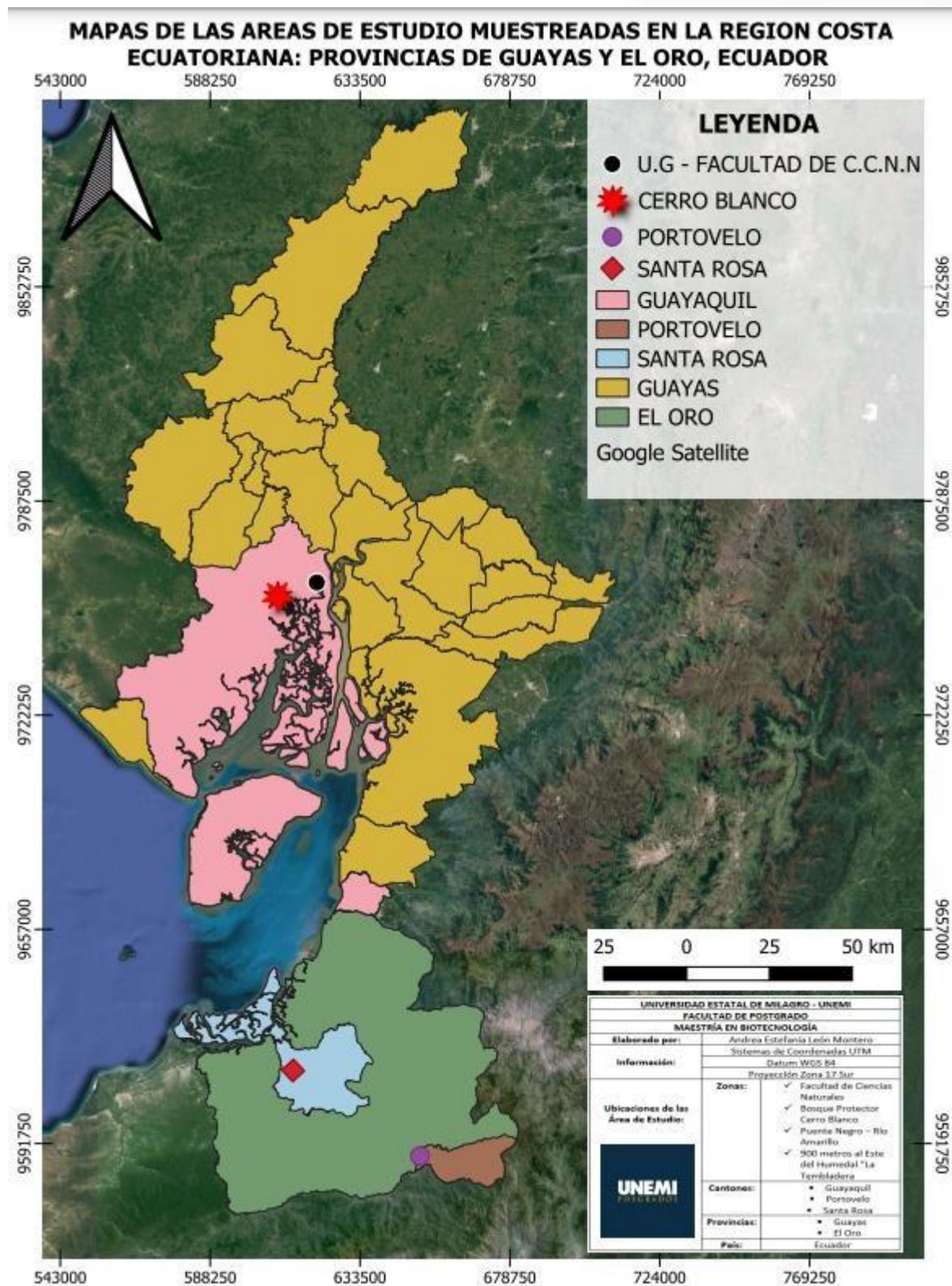
- Ramírez, N. (2016). Determinación de cadmio en los ríos Guayas, Daule y Babahoyo mediante el estudio de concentraciones en agua, sedimento y en el caracol manzana, *Pomacea canaliculata* (Lamarck, 1822) (Caenogastropoda: Ampullariidae). (Tesis de Grado para la obtención de título de Biólogo, Universidad de Guayaquil).
- Ramsey, K. (2023). Arsenic and respiratory disease. Handbook of Arsenic Toxicology, 381–394. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89847-8.00013-4>
- Reyes, J. (2020). Georreferenciación del humedal La Tembladera empleando la herramienta sig en el sistema operativo windows 10. Obtenido de <http://186.3.32.121/bitstream/48000/16045/1/ECFCS-2020-GEA-DE00013.pdf>
- Reyes, Y. C. (2021). Estudio de bioacumulación de metales pesados en plantas de consumo humano para sensado molecular In situ. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10554/54953>.
- Rodríguez, H., Peña, M., Gutiérrez, A., González, C., Montes, S., & López, G. (2017). Biorremediación de arsénico mediada por microorganismos genéticamente modificados. Terra Latinoam, 35(4), 353–361.
- Rodríguez, C. (2019). Intoxicación por arsénico. Medicina Legal de Costa Rica. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1409-00152021000300004
- Romero, W., Campuzano, J., & Rueda, N. (2017). Desarrollo económico productivo, social y turístico de las comunas ribereñas del humedal La Tembladera. Obtenido de <https://investigacion.utmachala.edu.ec/proceedings/index.php/utmach/article/view/45/37>
- Sáenz, S., Garcés, O., Córdoba, T., Blandon, L., Espinos, L., Vivas, L., & Canals, M. (2023). Contaminación por vertidos de aguas residuales: Una revisión de las interacciones microorganismos-microplásticos y sus posibles riesgos ambientales en aguas costeras colombianas. Ecosistemas, 32(1), 2489. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2489>
- Salas, C., Garduño, M., Mendiola, P., Vences, J., Zetina, C., Martínez, O., & Ramos, M. (2019). Fuentes de contaminación por plomo en alimentos, efectos en la salud y estrategias de prevención. Obtenido de Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha: <https://www.redalyc.org/journal/813/81359562002/81359562002.pdf>

- Saleh, A., Estatie, M., & Hamouz, A. (2017). "Removal of cadmium ions from wastewater by dithiocarbamate functionalized pyrrole based terpolymers. *Separation and Purification Technology*, 177, 101-109
- Secretaría de la Conservación de Ramsar. (2018). "Perspectiva mundial sobre los humedales: Estado de los humedales del mundo y sus servicios a las personas". Documento recuperado de https://www.ramsar.org/sites/default/files/flipbooks/ramsar_gwo_spanish_web.pdf
- Secretaría de la Convención sobre los Humedales. (2021). "Perspectiva mundial sobre los humedales: Edición especial de 2021". Gland. <https://www.ramsar.org/es/nuevas/la-perspectiva-mundial-sobre-los-humedales-edicion-especial-de-2021-destaca-la-importancia-de>
- Serafín, A., Guerrero, A., Rodríguez, U., Schüth, C., & Noriega, B. (2022). Bioindicators and biomonitoring: Review of methodologies applied in water bodies and use during the Covid-19 pandemic. *Acta Universitaria*, 32. <https://doi.org/10.15174/au.2022.3388>
- Speer, R., Zhou, X., Volk, B., Liu, J., & Hudson, L. (2023). Arsenic and cancer: Evidence and mechanisms. *Advances in Pharmacology*, 96, 151–202. <https://doi.org/10.1016/BS.APHA.2022.08.001>
- Urbina, A., Camac, Y., Solis, D., & Camargo, S. (2023). Contaminación de suelos por metales pesados en comunidades agrícolas. *Revista de Investigación*, 110(47), 66-85.
- Vaca, N., & Gaona, P. (2023). El sector minero en el Ecuador: desde la perspectiva de la teoría de juegos no cooperativos y repetidos (Bachelor's thesis, Riobamba: Universidad Nacional de Chimborazo).
- Valdivia, A. (2019). "Contaminación ambiental en los cuerpos de agua de los humedales de Costa Central de Lima - Perú". Obtenido de <https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/1442/TBValdivia%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Villón, B. (2022). Determinación de concentraciones de cadmio y mercurio en concha prieta, *Anadara tuberculosa* Sowerby, 1833, agua y sedimento del refugio de vida silvestre manglares El Morro (Bachelor's thesis, La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2022).

- Water Quality Association. (2024). Arsenic fact sheet. <https://wqa.org/resources/arsenic/>
- World Health Organization. (2022). Arsenic. <https://www.who.int/es/newsroom/fact-sheets/detail/arsenic>
- World Health Organization (2018). World Health Organization. Obtenido de <https://www.who.int/es/newsroom/fact>
- Zhang, H., & Mindy, R. (2019). Cadmium exposure in living organisms: A short review. Science of The Total Environment. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719319461>

ANEXOS

Anexo A: Zonas de muestreo correspondientes a las provincias del Guayas y el Oro.



Anexo B: Recolección de las muestras (raíces y suelo) para su posterior procesamiento y análisis.

