



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA

DISEÑO DE UN BIOFILTRO UTILIZANDO *LEMNA MINOR* (LENTEJA DE AGUA) Y *EICHHORNIA CRASSIPES* (JACINTO DE AGUA) PARA LA CAPTACIÓN DE METALES PESADOS (CD, CR Y PB) DEL RAMAL B DEL ESTERO SALADO GUAYAQUIL-ECUADOR

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniera en Biotecnología

AUTORA: HELEN ABIGAIL ZAMBRANO INTRIAGO

TUTOR: JOSE LUIS BALLESTEROS LARA

Guayaquil-Ecuador

2023

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

Yo, Helen Abigail Zambrano Intriago con documento de identificación N° 0926265125 manifiesto que:

Soy autora y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 7 de septiembre del año 2023

Atentamente,



Helen Abigail Zambrano
Intriago
0926265125

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

Yo, Helen Abigail Zambrano Intriago con documento de identificación No. 0926265125, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Trabajos experimentales: DISEÑO DE UN BIOFILTRO UTILIZANDO *LEMNA MINOR* (LENTEJA DE AGUA) Y *EICHHORNIA CRASSIPES* (JACINTO DE AGUA) PARA LA CAPTACIÓN DE METALES PESADOS (CD, CR Y PB) DEL RAMAL B DEL ESTERO SALADO GUAYAQUIL-ECUADOR, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero/a Biotecnólogo/a, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Guayaquil, 7 de septiembre del año 2023

Atentamente,



Helen Abigail Zambrano
Intriago
0926265125

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Jose Luis Ballesteros Lara con documento de identificación N° 1714838123, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UN BIOFILTRO UTILIZANDO *LEMNA MINOR* (LENTEJA DE AGUA) Y *EICHHORNIA CRASSIPES* (JACINTO DE AGUA) PARA LA CAPTACIÓN DE METALES PESADOS (CD, CR Y PB) DEL RAMAL B DEL ESTERO SALADO GUAYAQUIL-ECUADOR., realizado por Helen Abigail Zambrano Intriago con documento de identificación N° 0926265125, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Trabajos experimentales que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 7 de septiembre del año 2023

Atentamente,



PhD. Jose Luis Ballesteros Lara
1714838123

DEDICATORIA

Esto va dedicado a mis amados padres Hiter Zambrano y Jessika Intriago, cuyo inmenso amor y apoyo incondicional han sido mi roca y mi inspiración a lo largo de esta ardua travesía. A mis dos amados hijos James y Sophia quienes me motivaron a seguir hasta lo último. A mis hermanos por ayudarme en los que más pudieron. Su confianza en mí ha sido el combustible que ha alimentado mi determinación y me ha impulsado a alcanzar este logro. Su paciencia, comprensión y palabras de aliento han sido mi guía en los momentos de duda y desánimo. A cada uno de mis amigos, Jamileth, Gabriela, Cristina, cuya amistad ha sido un bálsamo para mi alma y cuyo ánimo y compañía han iluminado mi camino, también a las laboratoristas Anggie y Carla por ayudarme todo lo que pudieron. Su constante respaldo y apoyo moral han sido esenciales en mi camino hacia la culminación de este proyecto. A mi mentor José Ballesteros, cuya sabiduría y orientación han sido fundamentales en mi desarrollo académico y personal. Sus valiosas enseñanzas y dedicación incansable me han impulsado a superar mis propios límites y a crecer como investigador. A mi comadre por apoyarme en mi momento más importante que fue cuidar a mi hija. A aquellos que dudaron de mí, que me dijeron que no era posible, que me desafiaron a demostrarles lo contrario. Sus palabras me empujaron a convertir la incredulidad en determinación, y a encontrar fuerzas incluso en los momentos más difíciles. A todos y cada uno de ustedes, gracias por formar parte de este viaje. Esta tesis es el resultado de vuestro apoyo, comprensión, guía y motivación. Sus huellas están impresas en cada página, y mi gratitud hacia ustedes es eterna.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de esta tesis. En primer lugar, quiero agradecer a Dios por ser mi principal guía en este camino, luego a mi familia, quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional. Gracias por creer en mí, por entender las largas horas de estudio y por ser mi fuente constante de inspiración. Agradecer a mis hermosos hijos por venir a este mundo, porque fueron mi motor para seguir adelante y siempre lo seguirán siendo.

También a mi asesor académico, el ingeniero José Luis Ballesteros, por su guía, apoyo y conocimientos expertos a lo largo de todo el proceso de investigación. Su orientación y comentarios críticos fueron fundamentales para el desarrollo y la mejora de este trabajo. A mi cotutor Kevin Cedeño por tenerme paciencia y enseñarme todos sus conocimientos.

También quiero agradecer a todos los profesores y miembros del comité de tesis por su tiempo, dedicación y valiosas sugerencias. Sus aportes fueron de gran importancia para enriquecer el contenido y la metodología de investigación.

Agradezco a mis compañeros de clase y amigos por su aliento, motivación y por compartir conmigo sus ideas y perspectivas. Su apoyo incondicional fue fundamental para superar los desafíos y mantenerme enfocado en la consecución de mi objetivo.

Por último, quiero agradecer a todas las fuentes bibliográficas y recursos utilizados, así como a las instituciones y organizaciones que proporcionaron los datos necesarios para llevar a cabo esta investigación.

Este trabajo no habría sido posible sin la colaboración y el apoyo de todas estas personas y entidades mencionadas. Su contribución ha dejado una huella indeleble en esta tesis y en mi crecimiento académico y personal. ¡Gracias de todo corazón!

RESUMEN

El Estero Salado de Guayaquil, un ecosistema crucial en la costa ecuatoriana, enfrenta amenazas crecientes debido a actividades humanas y la consiguiente contaminación del agua. En este contexto, esta investigación se enfocó en desarrollar una solución efectiva para la remoción de metales pesados Cadmio Plomo y Cromo del Estero Salado. El objetivo central fue diseñar un biofiltro utilizando dos plantas acuáticas, *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes*, para reducir las concentraciones de metales pesados en el agua. El diseño del biofiltro involucró la construcción de una estructura con acrílico transparente y la estratificación cuidadosa de diferentes materiales, incluyendo carbono activo, arena, piedras y plumon, para maximizar la eficiencia de remoción. Los resultados revelaron que tanto *L. minor* como *E. crassipes* demostraron una alta eficacia en la remoción de metales pesados del agua del Estero Salado. En particular, se alcanzaron tasas de remoción altas para el cadmio, cromo y plomo, superando el 98% en la mayoría de los casos. Además, la combinación de ambas plantas en el biofiltro demostró trabajar mejor en sinergia, logrando una tasa de remoción del 89.87%. Estos resultados tienen implicaciones significativas tanto para la conservación del Estero Salado como para el bienestar de las comunidades locales que dependen de este ecosistema. La fitorremediación, como estrategia de remoción de metales pesados, se destaca por su efectividad y bajo costo, lo que la convierte en una herramienta valiosa en la mitigación de la contaminación del agua.

Palabras clave: Estero Salado, Metales Pesados, Fitorremediación, *Lemna minor*, *Eichhornia crassipes*, Biofiltro.

ABSTRACT

The Estero Salado of Guayaquil, a crucial ecosystem on the Ecuadorian coast, faces increasing threats due to human activities and consequent water pollution. In this context, this research focused on developing an effective solution for the removal of heavy metals Cadmium Lead and Chromium from the Estero Salado. The main objective was to design a biofilter using two aquatic plants, *Lemna minor* and *Eichhornia crassipes*, to reduce the concentrations of heavy metals in the water. The biofilter design involved the construction of a structure with transparent acrylic and the careful layering of different materials, including activated carbon, sand, stones and down, to maximize removal efficiency. The results revealed that both *L. minor* and *E. crassipes* demonstrated high efficiency in the removal of heavy metals from Estero Salado water. In particular, high removal rates were achieved for cadmium, chromium and lead, exceeding 98% in most cases. In addition, the combination of both plants in the biofilter proved to work better in synergy, achieving a removal rate of 89.87%. These results have significant implications both for the conservation of the Estero Salado and for the well-being of the local communities that depend on this ecosystem. Phytoremediation, as a heavy metal removal strategy, stands out for its effectiveness and low cost, which makes it a valuable tool in the mitigation of water pollution.

Key words: Estero Salado, Heavy Metals, Phytoremediation, *Lemna minor*, *Eichhornia crassipes*, Biofilter.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Capítulo 1	6
1.1 Introducción	6
1.2 Delimitación	8
1.3 Pregunta de investigación	10
1.4 Objetivos	11
1.4.1 Objetivo general:	11
1.4.2 Objetivos específicos:	11
1.5 Hipótesis	12
Capítulo 2	13
Marco teórico	13
2.1 Agua	13
2.1.1 Contaminación del agua	14
2.2 Estero Salado	15
2.2.1 Contaminación del Estero salado	16
2.3 <i>Lemna minor</i> (Lenteja de agua)	18
2.3.1 Taxonomía	19
2.3.2 Características generales de la <i>L. minor</i>	19
2.2.3 Usos potenciales	20
2.3 <i>Eichhornia crassipes</i> (Jacinto de agua)	20
2.3.1 Taxonomía	21
2.3.2 Características generales de <i>E. crassipes</i>	22
2.2.3 Usos potenciales	23
2.3 Biofiltro	23
2.3.1 Tipos de biofiltros	24
2.4 Metales pesados	26
2.4.1 Cadmio	27
2.4.2 Cromo	28
2.4.3 Plomo	29
2.5 Fitorremediación	30
2.5.1 Tipos de fitorremediación	30
2.6 Mecanismo general de absorción de metales pesados de las macrofitas	32
Capítulo 3	34

Materiales y métodos	34
3.1 Muestreo y análisis de agua estuarina.....	34
3.2 Recolección de las especies vegetales	35
3.3 Diseño de los biofiltros	37
3.4 Tratabilidad del agua.....	39
3.5 Cuantificación de metales pesados en agua y las especies <i>L. minor</i> y <i>E. crassipes</i>	40
3.5.1 Digestión ácida.....	40
3.6 Digestión por microondas para material vegetal	40
3.6 Cuantificación de metales pesados por medio de ICP-OES	42
3.7 Biorremediación de metales pesados por rizofiltración.....	42
3.7.1 Adición de metales pesados a las muestras de agua del Estero salado	42
3.7.2 Condiciones de tratamiento	43
3.7.3 Monitoreo y control.....	45
Capítulo 4.....	47
Resultados y Discusiones	47
4.1 Muestreo y análisis de agua estuarina.....	47
4.2 Recolección de las especies vegetales	47
4.3 Diseño de los biofiltros	48
4.4 Tratabilidad del agua.....	49
4.5 Cuantificación de metales pesados en agua y las especies <i>L. minor</i> y <i>E. crassipes</i>	52
4.6 Adición de sales con metales.....	53
4.7 Cuantificación de metales pesados en la muestra repotenciada por sales	55
4.8 Biorremediación de metales pesados por rizofiltración.....	56
4.9 Monitoreo y control.....	56
4.10 Remoción de metales pesados en el agua	60
4.11 Aspecto del agua	62
4.12 Aspecto de las plantas	63
4.14 Comportamiento de los parámetros de las plantas	64
4.15 Cuantificación final de metales pesados en las especies <i>L. minor</i> y <i>E. crassipes</i>...	68
Capítulo 5.....	70
Conclusiones	70
Recomendaciones	71
Referencias bibliográficas.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexos	72

ÍNDICE DEL TABLAS

Tabla 1 Coordenadas de área de estudio.....	8
Tabla 2 Coordenadas de recolección de agua.....	9
Tabla 3 Información de la ubicación de las áreas para el estudio y recolección	9
Tabla 4. División taxonómica de <i>Lemna minor</i>	19
Tabla 5. División taxonómica de <i>Eichhornia crassipes</i>	21
Tabla 6. Propiedades de los Metales Pesados.....	27
Tabla 7. Medición inicial de los parámetros del agua	47
Tabla 8. Medición inicial de los parámetros de la <i>L. minor</i> y <i>E. crassipes</i>	48
Tabla 9. Concentración inicial de metales pesados de la muestra de agua del estero salado ..	52
Tabla 10. Concentración de metales pesados de los 4 recipientes	55
Tabla 11. Comparación de valor inicial y final de los parámetros del agua.....	59
Tabla 12. Remoción de cadmio del agua en los 3 tratamientos	60
Tabla 13. Remoción de cromo del agua en los 3 tratamientos	61
Tabla 14. Remoción de cadmio del agua en los 3 tratamientos	61
Tabla 15. Criterio de calidad admisible para la preservación de la flora y fauna en aguas dulces, frías o cálidas, y en aguas marinas o estuarios.	72
Tabla 16. Descripción estadística de la concentración inicial de metales pesados.....	74
Tabla 17. Descripción estadística del pH	74
Tabla 18. Descripción estadística de la Conductividad Eléctrica.....	74
Tabla 19. Descripción estadística de los TDS	75
Tabla 20. Descripción estadística de la Clorofila	76
Tabla 21. Descripción estadística de los Nitrógeno.....	76
Tabla 22. Descripción estadística de la Humedad	77

ÍNDICE DEL FIGURAS

Figura 1. Condiciones actuales del Estero Salado.....	16
Figura 2. Ramal B del Estero Salado y el punto de muestreo	17
Figura 3. Lemna minor (Lenteja de agua).....	18
Figura 4. Eichhornia crassipes	21
Figura 5. Modelo y funcionamiento de Biofiltro	23
Figura 6. Mecanismos de la fitorremediación frente a los contaminantes	31
Figura 7. Equipo multiparámetro “MT01 OAKTON”	34
Figura 8. Muestras de agua del Estero salado	35
Figura 9. Lemna minor y Eichhornia crassipes en su habitat.....	36
Figura 10. Equipo “Manual Of Chlorophyll Meter TYS – 4N”	37
Figura 11. Prototipo del biofiltro.....	38
Figura 12. Recipiente de vidrio	39
Figura 13. Equipo de digestion por microondas “MARS 6” modelo 230/60 de la marca CEM	41
Figura 14. Equipo ICP-OES “iCAP 7000 SERIES ICP Spectrometer” de la marca Thermo SCIENTIFIC	42
Figura 15. Sales con metales pesados	43
Figura 16. Macronutriente “acualeaf MACROS” de la marca deacua de 240 ml.....	45
Figura 17. Diseño del biofiltro	49
Figura 18. Filtración gruesa de la muestra de agua.....	50
Figura 19. Prueba de coagulación y floculación	50
Figura 20. Coagulación y floculación por cada 36 litros de agua	52
Figura 21. Adición de sales con metales pesados	55
Figura 22. Condiciones del tratamiento	56
Figura 23. Día 15 del tratamiento.....	63
Figura 24. Clorosis en L. minor	64
Figura 25. Marchitamiento en la E. crassipes	64
Figura 26. Recolección de muestra de agua en el Estero Salado	78
Figura 27. Observación de la Lemna minor en el microscopio	78

ÍNDICE DEL GRÁFICAS

Gráfica 1. Comportamiento del pH en los 15 días de estudio del tratamiento	57
Gráfica 2. Comportamiento de la conductividad eléctrica en los 15 días de estudio del tratamiento.....	58
Gráfica 3. Comportamiento de TDS eléctrica en los 15 días de estudio del tratamiento	59
Gráfica 4. Porcentaje de remoción de metales pesados en el agua	62
Gráfica 5. Comportamiento de la clorofila en los 15 días de estudio del tratamiento.....	65
Gráfica 6. Comportamiento del nitrógeno en los 15 días de estudio del tratamiento.....	66
Gráfica 7. Comportamiento de la humedad en los 15 días de estudio del tratamiento	67
Gráfica 8. Contenido de metales pesados absorbidos por las plantas	68

Capítulo 1

1.1 Introducción

El Estero Salado de Guayaquil, situado en la costa ecuatoriana, consiste en un sistema estuarino compuesto por una compleja red de drenajes, desde el punto de vista geomorfológico y oceanográfico es un brazo de mar de gran importancia tanto desde el punto de vista ecológico como socioeconómico (García et al., 2020). En las últimas décadas, este estuario ha sido objeto de creciente interés por su biodiversidad, vulnerabilidad frente a las actividades humanas (Villalobos y López, 2018). Investigaciones recientes sobre la dinámica de este ecosistema, las implicaciones para la conservación de su riqueza biológica, como el bienestar de las comunidades locales, se han direccionado en la presión antrópica ejercida sobre este cuerpo de agua (Sánchez et al., 2019).

El manejo del Estero Salado enfrenta desafíos significativos relacionados con la contaminación, la urbanización no planificada y la sobreexplotación de recursos, pero, es precisamente en el primer punto donde se ha visto afectada la dinámica de este estuario, convirtiéndose en una amenaza para la salud del ecosistema (Rojas et al., 2021). Las principales causas han sido diversas, a saber, descargas de aguas residuales domésticas que no han tenido ningún tipo de tratamiento, también el vertido de desechos industriales y agrícolas, entre otras (Jiménez, 2021).

En los últimos años, los estudios hechos en este ecosistema presentaron que ha sufrido contaminación por metales pesados, superando los límites máximos permisibles según la normativa ambiental ecuatoriana, en las áreas de manglar, los niveles de cadmio y plomo se encontraron de 10 a 20 veces por encima de lo permitido en unas áreas, mientras que en otras áreas la contaminación fue mayor registrándose valores de 14 a 22 veces por encima del punto máximo aceptado por la norma ecuatoriana para cadmio y plomo, respectivamente (Pernía, 2018). Lo que ha provocado un gran deterioro en la dinámica del estero.

Estudios informan que la contaminación representa un riesgo para la salud neurológica de la población en las áreas circundantes, se han explorado los esfuerzos de remediación, pero se necesita trabajar más para abordar el problema del aumento de metales pesados en el Estero Salado (Guarco, 2015). Por ello, a estos contaminantes se les da más atención, debido a que no se biodegradan, son tóxicos, aunque estén en bajas cantidades o acumulándose en zonas

estuarinas y costeras (Mendoza & Pilaguano, 2021). Estos elementos se van almacenando en los organismos acuáticos entre sus tejidos, este proceso se conoce como bioacumulación y biomagnificación. Es, por tanto, necesario cuantificar estos metales. Se puede llegar a plantear un método para tratarlos, entre estos químicos los más tóxicos que se conocen son cadmio, cromo y plomo que están presentes en el Estero Salado (Mestanza & Varas, 2021).

En la actualidad se han producido diferentes avances en la biotecnología, que se dedican a remediar lugares o medios contaminados mediante el uso de plantas y varios organismos relacionados, a este proceso se lo conoce como fitorremediación, reduciendo la concentración o peligrosidad de diferentes contaminantes, ya sea del suelo, agua o aire, mediante una serie de procesos bioquímicos (Chicaiza et al., 2023). Debido a esto, la biorremediación del Estero Salado es posible con el uso de plantas para recuperar la calidad del agua, por medio de sus raíces y restaurar todo el ecosistema del estuario, incluso, otros alcances serían la eliminación de materia orgánica, disminución de los niveles de contaminantes y metales pesados, entre otros, promoviendo la conservación de recursos para la vida considerando su desarrollo sostenible (Tapia, 2015).

El uso de biofiltros para el tratamiento de aguas residuales ha sido una alternativa que ha dado buenos resultados debido a sus bajos costos de operación, por este motivo, ciertas plantas acuáticas denominadas macrófitas se utilizan para aprovechar la materia orgánica presente en el agua residual, permitiendo el manejo de estos contaminantes con más facilidad (Lucio et al., 2023)

Las especies vegetales *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes* cumplen un papel muy importante en el ecosistema acuático, ya que brindan alimento y se utilizan para procesos de biorremediación siendo útiles para el ser humano, estas plantas son abundantes por su capacidad de reproducción, además poseen una gran capacidad de absorción de nutrientes (Malaver, 2013). Algunas investigaciones afirman que la lenteja de agua (*Lemna minor*) y el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) podrían utilizarse como herramientas de fitorremediación para eliminar metales pesados de aguas contaminadas (Castrillon & Navarro, 2017). Algunos de estos estudios también han comparado la eficacia de estas plantas con otras plantas acuáticas, incluso se han encontrado que estas macrófitas son efectivas en la absorción de metales pesados (Gutiérrez & Zapata, 2023).

Estas plantas acuáticas tienen la capacidad de absorber metales pesados como el cadmio y el mercurio en su tejido, transformándolos en compuestos no tóxicos, en algunos estudios se ha demostrado que la *L. minor* es capaz de absorber hasta el 90,33% del cadmio presente en el agua, mientras que el *E. crassipes* tuvo un mejor rendimiento en la absorción de plomo con un 79,09% (Aquino, 2023). Sin embargo, es importante tener en cuenta que la fitorremediación con plantas acuáticas no es una tecnología completamente desarrollada, debido a que puede haber algunos desafíos asociados con su uso, como la selección de las especies de plantas adecuadas además de la eliminación segura de las mismas después de su uso (Hernández & Hernández, 2022).

Según Edgar Bedolla (2019) las especies vegetales *L. minor* y *E. crassipes* demostraron una alta propiedad de captación de metales pesados para la fitorremediación del agua en el río Moquegua ubicado en la costa sur de Perú, reduciendo estos hasta un 94,71 % en un lapso de 30 días. En otra investigación por Mariuxi Jaramillo y Edison Flores (2012), se demostró que las macrófitas acuáticas absorbieron el 29,5% de mercurio afirmando que son efectivas para la remoción de metales pesados.

1.2 Delimitación

Para el desarrollo del presente trabajo, el área de estudio se centró en el campus María Auxiliadora de la Universidad Politécnica Salesiana ubicado en la ciudad de Guayaquil, Ecuador. Geográficamente, el campus se encuentra en Vía a la costa Km 19,5 en una zona urbana de fácil acceso a través de diversas rutas de transporte público y vías principales. Donde se trabajó en el bloque B en los laboratorios de instrumental e industrial desde el 15 de julio hasta el 25 de agosto del año 2023. Cabe destacar que el acceso a estas áreas suele estar restringido por horarios específicos y disponibilidad de recursos, factores que se han tomado en consideración para el desarrollo de este trabajo.

Tabla 1 Coordenadas de área de estudio

	Sector	Latitud	Coordenadas
Universidad Politécnica Salesiana	Norte	-2.194250	-80.044794

Fuente: (Zambrano, 2023).

La recolección de muestras de agua se llevó a cabo en el Estero Salado, en las calles de la Víctor Emilio Estrada y la 9NO de Urdesa-Miraflores situado en la ciudad de Guayaquil, Ecuador. Las muestras se recogieron en la superficie del estero el 5 julio del año 2023.

Tabla 2 Coordenadas de recolección de agua

	Sector	Latitud	Coordenadas
Estero salado	Norte	-2.162520	-79.919146

Fuente: (Zambrano, 2023).

La recolección de la *L. minor* se llevó a cabo en el reservorio del campus María Auxiliadora como nos indican las coordenadas de la **tabla 3**, mientras que la *E. crassipes* se recolecto en el canal del colegio Tnte. Hugo Ortiz Garces de la Ciudad de Guayaquil. Estas plantas han sido seleccionadas tomando en cuenta diversos factores como la densidad de la vegetación y la accesibilidad. La recolección de las plantas se realizó el 4 de agosto del 2023.

Tabla 3 Información de la ubicación de las áreas para el estudio y recolección

	Sector	Latitud	Coordenadas
<i>L. minor</i>	Norte	-2.108206	-79.905319
<i>E. crassipes</i>	Norte	-2.197132	-80.043182

Fuente: (Zambrano, 2023).

1.3 Pregunta de investigación

¿Qué tan eficiente es el uso de las macrófitas *Lemna minor* (lenteja de agua) y *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) funcionando en sinergia dentro de un biofiltro, para la absorción de metales pesados como el cadmio, cromo y plomo en el Estero salado, ya que es uno de los ecosistemas más importantes del Ecuador y qué tan resistentes son estas plantas al agua estuarina a pesar de ser naturalmente de agua dulce?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general:

- Reducir concentraciones de metales pesados (Cd, Pb y Cr) de la muestra de agua del Estero Salado con el uso de las plantas *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes* mediante el diseño de un biofiltro.

1.4.2 Objetivos específicos:

- Cuantificar la concentración de metales pesados (Cd, Cr y Pb) de la muestra de agua del Ramal B del Estero Salado mediante la técnica de espectrofotometría ICP-OES para conocer el valor inicial y final.
- Determinar el contenido de metales pesados (Cd, Cr y Pb) en el tejido vegetal de la *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes* al final.
- Evaluar la actividad remediadora en el biofiltro diseñado que contiene la *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes* sobre la muestra de agua contaminada para absorber metales pesados (Cd, Pb y Cr).

1.5 Hipótesis

Hipótesis nula (H0): El uso de las especies vegetales *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes* aplicados al biofiltro no logro reducir los metales pesados (Cd, Cr y Pb) en la muestra de agua del Estero Salado.

Hipótesis alternativa (H1): El uso de las especies vegetales *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes* aplicados al biofiltro logro reducir los metales pesados (Cd, Cr y Pb) en la muestra de agua del Estero Salado.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Agua

El agua ocupa un lugar central en el desarrollo sustentable, siendo esencial para el progreso socioeconómico, la generación de energía, la producción de alimentos, el funcionamiento de los ecosistemas y la supervivencia de la humanidad, además, desempeña un papel crucial en la adaptación al cambio climático y constituye un vínculo vital entre la sociedad y el entorno natural (ONU, 2021).

El agua es una sustancia líquida fundamental para la vida en la Tierra, compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H₂O), que juega un papel esencial en procesos biológicos, como la digestión y la regulación de la temperatura corporal, además es esencial en la agricultura para el riego de cultivos y la cría de ganado, así como en la generación de energía, en forma de energía hidroeléctrica y refrigeración de plantas de energía (Guerrero, 2023).

En la Tierra se encuentra principalmente en forma de agua salada en los océanos, mientras que solo una pequeña fracción es agua dulce que es utilizado para el consumo humano y el uso agrícola e industrial (Grueso et al., 2019). La gestión adecuada de los recursos hídricos es importante para garantizar la sostenibilidad a largo plazo, de estas dos categorías que se diferencian por su contenido de sal y se encuentran en diferentes tipos de cuerpos de agua (Corbin, 2018).

Además, el agua tiene una amplia gama de propiedades físicas y químicas que son fundamentales para su papel en la vida hasta en los procesos naturales. (Untiveros & Salvatierra, 2022). Una de sus propiedades físicas es que el agua alcanza su densidad máxima a 4°C, lo que significa que es más densa en forma líquida a esta temperatura, esto permite el desarrollo de la vida acuática, ya que el agua más fría tiende a hundirse (Zarza, 2021). Tiene una alta capacidad calorífica, lo que significa que puede absorber y retener una gran cantidad de calor sin experimentar un aumento significativo en la temperatura, esto ayuda a moderar las temperaturas en todos los organismos vivos (Trujillo & Cajigas, 2018).

El agua es esencial para la vida en nuestro planeta, ya que constituye la mayor parte de la composición de los organismos vivos y juega un papel crucial en muchas funciones biológicas, como la regulación de la temperatura corporal, el transporte de nutrientes y la eliminación de desechos (Wallenius, 2019).

2.1.1 Contaminación del agua

En el agua se ha producido la introducción de sustancias o agentes contaminantes en cuerpos de agua, como ríos, lagos, océanos, acuíferos incluso fuentes de agua potable, que han alterado su calidad, haciendo que el agua sea peligrosa o no apta para su uso previsto, que puede ser causada por actividades humanas y naturales, pero en su mayoría se relaciona con acciones humanas (Endara et al., 2020).

Estos contaminantes pueden tener efectos negativos en la salud humana, ya que, el consumo de agua contaminada conlleva a consecuencias para la salud humana, como enfermedades transmitidas por el agua (diarrea, cólera, hepatitis), problemas gastrointestinales, y a largo plazo, incluso cáncer o daños en órganos internos (Vilela et al., 2018).

Los efectos pueden variar según el tipo, la concentración de contaminantes presentes en el agua, la duración de la exposición hasta la salud general de la persona, la exposición a ciertos contaminantes en el agua, como el plomo o los disruptores endocrinos, que pueden afectar el desarrollo cognitivo y físico de los niños, lo que puede llevar a retrasos en el crecimiento incluso tener problemas en el aprendizaje (Alegbeleye & Santana, 2020).

Algunos contaminantes en el agua pueden debilitar el sistema inmunológico, lo que hace que las personas sean más susceptibles a infecciones y enfermedades, además, la inhalación de vapores o aerosoles contaminados del agua, como los generados por ciertos productos químicos tóxicos, puede causar problemas respiratorios hasta agravar condiciones preexistentes como el asma (Sankhla et al., 2018).

La contaminación del agua puede provenir de diversas fuentes, como vertidos industriales, descargas de aguas residuales sin tratar, escorrentía de tierras agrícolas y urbanas, derrames de petróleo, entre otros (Schweitzer & Noblet, 2018). Los contaminantes del agua

pueden clasificarse en varios grupos, incluyendo contaminantes físicos (sedimentos, materia orgánica), químicos (productos químicos tóxicos, nutrientes excesivos como nitratos y fosfatos) y biológicos (microorganismos patógenos) (Ossai et al., 2020). Entre los contaminantes que se pueden encontrar tenemos los metales pesados, compuestos inorgánicos como nitratos, nitritos y fluoruros, hidrocarburos, patógenos, desechos biológicos, sustancias químicas hasta el exceso de nutrientes (Pabón, 2020).

Incluso han provocado efectos devastadores en los ecosistemas acuáticos y terrestres, debido a que pueden ocasionar la muerte de peces y otras formas de vida acuática, la degradación del hábitat y la reducción de la biodiversidad (Iravanian & Ravari, 2020). Incluso en los ecosistemas terrestres circundantes se han infiltrado contaminantes que afectan la vegetación, la fauna y los seres humanos que dependen de esos recursos (singh & Steinnes, 2020).

2.1.2 Reglamentación referente a estuarios

Los gobiernos y las organizaciones internacionales implementan regulaciones y políticas para controlar y reducir la contaminación del agua, estas medidas incluyen estándares de calidad del agua, restricciones en las descargas y la promoción de prácticas sostenibles (Schmidt, 2021). En la **tabla 15** se describe las normas de calidad de los diferentes tipos de agua.

2.2 Estero Salado

El Estero Salado se encuentra en la parte occidental de la ciudad de Guayaquil, la ciudad más grande de Ecuador, y desemboca en el Golfo de Guayaquil en el océano Pacífico. Es un cuerpo de agua que experimenta fluctuaciones en la salinidad debido a las mareas, durante la marea alta, el agua salada del océano ingresa al estero, y durante la marea baja, el agua dulce fluye desde ríos cercanos, como el río Guayas, que desemboca en el estero (Arroyo et al., 2015).

El estero es un hábitat crítico para una variedad de especies de aves, peces y otros organismos marinos, también es un lugar importante para la reproducción y alimentación de diversas especies de peces, lo que lo convierte en un área valiosa para la pesca. Además, tiene

un valor cultural y recreativo para los habitantes de Guayaquil, incluso se han creado paseos y miradores para que las personas disfruten de la belleza natural del estero y observen la vida silvestre (Navarrete et al., 2019).

2.2.1 Contaminación del Estero salado

El Estero Salado de Guayaquil ha enfrentado desafíos significativos debido a la contaminación, la urbanización y la degradación del ecosistema, debido a la expansión urbana que ha dado como resultado la pérdida de áreas del manglar, que son importantes para la protección costera y la biodiversidad. Por lo que ha sido objeto de preocupación en vista de que afecta negativamente la calidad de vida de las especies de flora y fauna que habitan en él (Pernía et al., 2018).

Se han realizado esfuerzos para descontaminar el estero salado y mejorar su calidad de agua y sedimento, así como controlar el vertido de aguas residuales y desechos sólidos en el área, también se han llevado a cabo evaluaciones de la contaminación fisicoquímica y microbiológica de las aguas del estero salado para medir su impacto en el medio ambiente y la salud humana (Mariscal et al., 2018). En la **figura 1** se puede apreciar las condiciones de cómo se encuentra el Estero Salado en la actualidad.

Figura 1. Condiciones actuales del Estero Salado



Fuente: (Andrade, 2023).

El Estero se encuentra subdividido en cuatro áreas, y dentro de la zona 4, se identifican siete segmentos designados como A, B, C, D, E, F, G, que están situados al este de la ciudad de Guayaquil, debido a la preocupación de la población que se centra en la contaminación de los diversos tramos del Estero Salado, se identificó que el tramo B se ha señalado como el más afectado por la contaminación, por lo que varios expertos sugieren que se debería llevar a cabo una evaluación exhaustiva del sistema de tratamiento de aguas residuales, con el fin de implementar medidas de control sanitario y un plan de acción para reducir los niveles de contaminación (Lahmeyer-Cimentaciones, 2000).

En la **figura 2** podemos observar que el tramo B se encuentra ubicado desde el comisariato de la calle Km 4,5 de la Vía a Daule hasta el paso peatonal zigzag de Guayarte que permite la unión de Urdesa con la Universidad Católica (SGS del Ecuador S.A, 2018). En un análisis sobre las concentraciones de metales pesados en muestras de sedimentos en el ramal B del Estero Salado, como el cadmio, cromo, níquel y plomo, los resultados mostraron niveles altos de Cd de 4.05 ppm, Cr de 52.81 ppm, Ni de 31.01 ppm y Pb de 37.35 ppm (Guarco, 2015).

Figura 2. Ramal B del Estero Salado y el punto de muestreo



Fuente: (Zambrano, 2023)

2.3 *Lemna minor* (Lenteja de agua)

La lenteja de agua es una pequeña planta acuática flotante que pertenece a la familia Araceae y es una de las especies más comunes dentro del género *Lemna* y se encuentra ampliamente distribuida en diferentes cuerpos de agua dulce en todo el mundo, considerada la planta con flores más pequeña que se conoce y se encuentra en la mayor parte de África, Asia, Europa y América del Norte (Plate, 2019).

Debido a su alta concentración de proteínas, la *L. minor* se ha considerado como una alternativa sostenible a las fuentes de proteína tradicionales, como la carne, y se utiliza también como alimento para animales acuáticos, en algunas partes del mundo se consume como alimento humano, ya sea en forma de ensalada cruda o cocida (Sandoval, 2019). Además, se ha utilizado como un medio natural para controlar las poblaciones de mosquitos, ya que proporciona refugio y alimento para los predadores de mosquitos acuáticos. (Lopez & Barrera, 2021).

Figura 3. *Lemna minor* (Lenteja de agua)



Fuente: (Zambrano, 2023)

2.3.1 Taxonomía

Tabla 4. División taxonómica de *Lemna minor*

TAXONOMIA	
Reino	Plantae
Familia	Araceae
Clase	Equisetopsida
Subclase	Magnolita
Orden	Alismatales
Género	<i>Lemna L.</i>

Fuente: (Linnaeus, 1753)

2.3.2 Características generales de la *L. minor*

Es una planta pequeña que forma grupos de hojas flotantes en la superficie del agua. Cada planta consiste en una única pequeña hoja ovalada que mide aproximadamente de 1 a 5 mm de longitud (Torres, 2020). La *L. minor* se propaga rápidamente a través de reproducción vegetativa de manera asexual a través de la división, donde nuevos individuos se generan por brotes laterales llamados "yemas" que se separan y forman nuevas plantas (Segalá, 2019). El tiempo que tarda en reproducirse puede variar según las condiciones ambientales y la disponibilidad de nutrientes en el agua, en condiciones favorables, la *L. minor* puede duplicar su población en cuestión de días a semanas, debido a su rápida tasa de reproducción, es capaz de formar densas capas flotantes en cuerpos de agua en un corto período de tiempo (Segalá, 2019).

Aunque algunos la consideran una maleza acuática, la *L. minor* juega un papel importante en los ecosistemas acuáticos, debido a que proporciona refugio y alimento para una variedad de organismos acuáticos, como insectos, peces y aves (Plate, 2019). También es conocida por su capacidad de fitorremediación, lo que significa que puede absorber y acumular nutrientes y contaminantes, como nitrógeno y fósforo, del agua, esta característica la convierte

en una opción interesante para ayudar a mejorar la calidad del agua en cuerpos acuáticos contaminados (Torres, 2020).

2.2.3 Usos potenciales

La *L. minor* ha sido objeto de investigación científica debido a su capacidad de crecimiento rápido y su potencial aplicación en la biorremediación de aguas contaminadas, la planta también se usa comúnmente para experimentos de ecotoxicidad para evaluar la toxicidad de los contaminantes en el agua y los lixiviados de vertederos (Navarro, 2019). En algunos lugares, se ha utilizado *L. minor* de agua como control biológico de mosquitos y otros insectos, ya que proporciona una superficie de desove atractiva para estos insectos, pero también ofrece un hábitat para los predadores naturales de las larvas de los mosquitos (Segalá, 2019).

2.3 *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua)

El jacinto de agua también conocida como camalote, aguapey, lechuguín o lirio de agua es una planta acuática flotante originaria de América del Sur, perenne y prospera en climas tropicales y subtropicales, se ha naturalizado y convertido invasora en muchas otras partes del mundo (Tejada et al., 2018). La planta puede reproducirse rápidamente y cubrir grandes áreas de estanques y lagos, provocando la eliminación de peces y la obstrucción de cursos de agua, los esfuerzos para controlar la *E. crassipes* dependen de la ubicación específica y pueden incluir métodos químicos, físicos y biológicos, así como la cosecha de la planta para diversos usos, como el compostaje y la producción de papel (Paredes & Ñique, 2018).

La *E. crassipes* tiene diversos usos en diferentes culturas, incluyendo el uso para la elaboración de canastas y esteras en algunas áreas de Filipinas, también se utiliza para la purificación del agua, previniendo la proliferación de algas y purificando el agua contaminada con metales pesados y otros productos químicos (Monroy et al., 2022). Además, se ha estudiado su uso para la depuración de aguas contaminadas con cromo y también se ha descubierto que tiene propiedades medicinales que incluyen aliviar la fiebre, el dolor de cabeza y las diarreas (Sandoval, 2022)

Figura 4. *Eichhornia crassipes*



Fuente: (Zambrano, 2023)

2.3.1 Taxonomía

Tabla 5. División taxonómica de *Eichhornia crassipes*

TAXONOMÍA	
Reino	Plantae
Familia	Pontederiaceae
Clase	Equisetopsida
Subclase	Magnoliidae
Orden	Commelinales
Género	<i>Eichhornia.</i>

Fuente: (Solmes, 1883).

2.3.2 Características generales de *E. crassipes*

La *E. crassipes* tiene hojas verdes brillantes en forma de corazón que flotan en la superficie del agua, además tiene raíces largas y sumergidas que se extienden en el agua llamadas también tricomas (Ayanda et al., 2020). Tiene unas flores que son llamativas y pueden variar en color desde el azul claro hasta el violeta intenso, cada flor tiene tres pétalos grandes y una estructura tubular en el centro (Tejada et al., 2018). Se propaga rápidamente y en exceso a través de la reproducción vegetativa y la producción de semillas, donde un solo individuo puede generar una población densa en poco tiempo, llegando a cubrir grandes áreas de agua, por otro lado, pueden llegar a crecer hasta 20 o 30 cm de alto (Chingay & Eduardo, 2018).

En su hábitat de origen, puede proporcionar refugio y alimento a diversas formas de vida acuáticas como los peces y otros organismos que pueden encontrar protección y áreas de desove entre las raíces y hojas de la planta, además pequeños invertebrados pueden habitar en las raíces y en la materia orgánica asociada a la *E. crassipes* (Paredes & Ñique, 2018).

Aunque puede ser invasiva en muchos ecosistemas, en ciertos casos puede ayudar a mejorar la calidad del agua, esta planta puede absorber nutrientes en exceso, como nitrógeno y fósforo, que son comunes en aguas contaminadas por actividades humanas como la agricultura y la industria, al hacerlo, puede ayudar a prevenir la proliferación de algas y la eutrofización en cuerpos de agua (Chingay & Eduardo, 2018).

Puede formar densas capas flotantes en la superficie del agua, lo que puede ayudar a reducir la erosión de las orillas de cuerpos de agua al disminuir el impacto directo de las olas y corrientes (Mendieta & Zambrano, 2019). Además, la *E. crassipes* tiene un impacto negativo significativo en los ecosistemas acuáticos, ya que, al cubrir la superficie del agua, bloquea la luz solar y reduce la disponibilidad de oxígeno en el agua, afectando la vida acuática y la calidad del agua, también puede obstruir el flujo de agua e interferir con actividades humanas y favorecer la proliferación de mosquitos (Vásquez, 2018).

2.2.3 Usos potenciales

Aunque es una especie invasora, en algunos lugares se han realizado investigaciones sobre el uso de la *E. crassipes* para la producción de biogás, la eliminación de metales pesados del agua y como materia prima para la fabricación de productos artesanales (Monroy et al., 2022). En algunos casos, se ha utilizado el jacinto de agua como una especie de "trampa" para controlar poblaciones de mosquitos, ya que la planta proporciona un lugar de reproducción para las larvas de mosquitos, lo que facilita su control.

El lirio acuático ha demostrado su eficacia como fitorremediador al eliminar compuestos organofosforados, lo que sugiere su potencial desde purificar aguas residuales, producción de etanol, papel y composta, hasta la generación de biogás, alimentos humanos y forraje animal, así como la obtención de fibras y ácidos grasos volátiles (Lara et al., 2022).

2.3 Biofiltro

Es un dispositivo utilizado para la remoción de contaminantes en el agua o las emisiones gaseosas (Rodríguez, 2022). Consiste en un filtro que se carga con un material poroso y en la superficie del cual se siembran microorganismos, que eliminan los contaminantes a medida que el agua o el aire pasa a través del medio filtrante, los biofiltros son una alternativa eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas grises y residuales, y también para el control de emisiones gaseosas en procesos industriales, así como para el tratamiento de olores (Masco & Ugarte, 2022). En la **figura 3** podemos observar el funcionamiento de los biofiltros

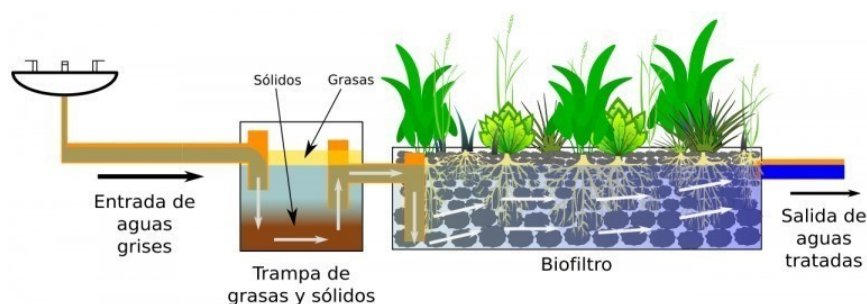


Figura 5. Modelo y funcionamiento de Biofiltro

Fuente: (Moksa, 2022).

Los biofiltros se utilizan comúnmente en el tratamiento de aguas residuales, tanto en instalaciones domésticas como industriales, los microorganismos en el biofiltro descomponen los compuestos orgánicos y reducen la concentración de nutrientes como nitrógeno y fósforo (Cruz, 2018). También pueden utilizarse para eliminar compuestos orgánicos volátiles (COVs) incluso los olores del aire, los contaminantes se adsorben para biodegradarse por medio de los microorganismos presentes en el biofiltro, permitiendo que el aire purificado sea liberado al ambiente (Gallego et al., 2013).

El uso de los biofiltros son una opción de tratamiento sostenible y respetuosa con el medio ambiente, ya que no requieren el uso de productos químicos adicionales y utilizan procesos biológicos naturales, además, pueden ser más económicos y eficientes en ciertos contextos que otras tecnologías de tratamiento (Thalasso, 2002).

La eficiencia de un biofiltro depende de varios factores, como la elección de los microorganismos adecuados, el tipo de medio de soporte, la temperatura, el pH y la concentración de los contaminantes presentes en el agua o aire a tratar (Vergara, 2021). Incluso requieren un mantenimiento adecuado para garantizar su eficiencia a lo largo del tiempo, esto puede incluir la limpieza y reposición periódica del medio de soporte, así como el monitoreo de las condiciones ambientales y la actividad microbiana (Tapia, 2007).

2.3.1 Tipos de biofiltros

Sistema a flujo libre (FWS)

Los biofiltros de flujo libre superficial son sistemas de tratamiento de aguas que utilizan vegetación y microorganismos para eliminar contaminantes en el agua mientras esta fluye libremente sobre una superficie, además, estos sistemas son particularmente adecuados para la depuración de aguas residuales y la mejora de la calidad del agua en entornos urbanos y rurales (Arteaga et al., 2019).

En lugar de estar confinados en un lecho elevado, los biofiltros de flujo libre superficial se construyen a nivel del suelo o ligeramente elevados, para que el agua fluye sobre la superficie de estos sistemas, permitiendo una mayor interacción con la vegetación y los microorganismos (Bladé, 2015). La vegetación plantada en la superficie de los biofiltros juega un papel clave en

el tratamiento del agua, ya que, las raíces de las plantas proporcionan un medio para el crecimiento de microorganismos beneficiosos que descomponen los contaminantes (Requejo, 2020).

A medida que el agua fluye sobre la superficie del biofiltro, entra en contacto con las raíces y los microorganismos presentes, donde estos microorganismos realizan procesos biológicos como la descomposición de materia orgánica y la eliminación de nutrientes, se produce un proceso de filtración natural, ya que, las partículas suspendidas y algunos contaminantes son capturados y retenidos en el sistema (Franco et al., 2016).

Los biofiltros de flujo libre superficial son eficientes en la eliminación de sólidos suspendidos, nutrientes como nitrógeno y fósforo, contaminantes orgánicos presentes en el agua, también ayudan a reducir los picos de caudales en períodos de lluvia, al absorber y retener parte del agua antes de liberarla gradualmente (Peña & Lara, 2012).

Sistema de flujo subsuperficial (SFS)

Los biofiltros de sistema de flujo subsuperficial son sistemas de tratamiento de aguas que utilizan una capa de material filtrante, como grava o arena, ubicada por debajo de la superficie del suelo o el agua para purificar el agua contaminada, que se basan en procesos biológicos, físicos y químicos para eliminar contaminantes y mejorar la calidad del agua (Flores, 2019). Las aguas residuales contaminadas se introducen en la capa de material filtrante desde la superficie o mediante sistemas de tuberías subterráneas, luego dentro de la capa de material filtrante, se desarrolla una comunidad de microorganismos beneficiosos que descomponen y biodegradan contaminantes orgánicos en el agua (Chenet et al., 2018).

Estos microorganismos realizan procesos biológicos como la desnitrificación y la oxidación de la materia orgánica, el material filtrante actúa como un medio poroso que atrapa partículas suspendidas y permite la adsorción y la retención de contaminantes, incluso puede ocurrir cierta eliminación química de contaminantes a medida que el agua atraviesa la capa de material (Dávila & López, 2020).

El agua tratada, o efluente, se recoge en la salida del sistema de flujo subsuperficial y puede ser liberada al medio ambiente o dirigida a un sistema de tratamiento adicional si es

necesario cumplir con los estándares de calidad del agua, estos sistemas requieren un mantenimiento periódico para garantizar su eficacia a lo largo del tiempo, lo que puede incluir la limpieza de la capa de material filtrante y la monitorización del rendimiento (Andrade & Rosero, 2018).

2.4 Metales pesados

Los metales pesados son un grupo de elementos químicos que presentan una densidad alta con un número atómico mayor a 20, algunos ejemplos de metales pesados son el mercurio, plomo, cadmio, cobre, zinc, níquel, cromo y arsénico como se aprecia en la **tabla 4**, los cuales son tóxicos para los seres humanos y otros organismos en altas concentraciones, y pueden causar una variedad de problemas de salud (Pabón et al., 2020).

Los metales pesados se encuentran naturalmente en la corteza terrestre y se utilizan en la industria y en productos cotidianos como pinturas, baterías, pesticidas y medicamentos (Hernández et al., 2022). La exposición a metales pesados puede ocurrir a través del aire, agua y alimentos contaminados, así como en el lugar de trabajo, por lo tanto, es importante controlar y minimizar la exposición a estos metales para proteger la salud humana y el medio ambiente (Flores et al., 2018).

Algunos metales, como el plomo, el mercurio, el cadmio, el arsénico y el cromo, son considerados como metales pesados y tienen propiedades tóxicas para los organismos vivos en concentraciones elevadas (Salas et al., 2021). Los metales pueden contaminar el agua desde diversas fuentes, como la actividad minera, las industrias metalúrgicas, la liberación de metales pesados desde vertederos y escombreras, y el uso de pesticidas y fertilizantes que contienen metales (Aguirre et al., 2021).

Tabla 6. Propiedades de los Metales Pesados

Elemento	Símbolo	Numero atómico (Z)	Masa atómica (A)
Zinc	Zn	30	65.39
Níquel	Ni	28	58.6934
Cadmio	Cd	48	112.411
Cobre	Cu	29	63.546
Plomo	Pb	82	207.2
Mercurio	Hg	80	200.59
Arsénico	As	33	74.9216
Cromo	Cr	24	51.9961

Fuente: (IUPAC, 2022)

2.4.1 Cadmio

El cadmio es un metal pesado que puede ser liberado al medio ambiente como resultado de la extracción y refinación de otros metales como el zinc, el plomo, y el cobre, también puede ser liberado a través de la quema de combustibles fósiles y la producción de ciertos tipos de baterías (Quispe et al., 2019).

Una vez liberado, el cadmio puede acumularse en el suelo, el agua y el aire, y puede ser tóxico para las plantas, debido a que no es esencial para las mismas cuando llega a tener una alta concentración, matando así la planta (Falero, 2021). El cadmio es un metal blando, de color blanco azulado, que se utiliza en diversas aplicaciones industriales, como en baterías, recubrimientos, pigmentos, plásticos y soldaduras (Quintero, 2021).

Las principales fuentes de contaminación del agua con cadmio incluyen vertidos industriales, liberación de cadmio desde minas y depósitos de desechos, escorrentía agrícola y la incineración de materiales que contienen cadmio (Coronel, 2018). El cadmio es altamente tóxico para los seres vivos, puede afectar negativamente diversos sistemas del cuerpo humano, incluyendo los riñones, los pulmones, el sistema cardiovascular y el sistema reproductivo (Salas et al., 2021). Además, el cadmio puede bioacumularse en los organismos acuáticos y, a medida

que se asciende en la cadena alimentaria, puede biomagnificarse, lo que significa que las concentraciones aumentan a medida que los depredadores consumen presas contaminadas (Uriña, 2022).

La presencia de cadmio en el agua puede tener efectos devastadores en los ecosistemas acuáticos, debido a que puede provocar la muerte de organismos acuáticos, alterar la composición de la comunidad incluso dañar los hábitats (Madueño & García, 2018). También puede afectar el comportamiento de los organismos acuáticos, como la natación, la alimentación y la búsqueda de refugio, esto puede reducir la capacidad de los organismos para sobrevivir y reproducirse (Mayia, 2021).

2.4.2 Cromo

El cromo es un elemento químico que se encuentra de forma natural en el medio ambiente en pequeñas cantidades, principalmente en rocas y suelos, puede ser liberado al medio ambiente a través de varias actividades humanas, como la minería, el uso industrial y la eliminación de residuos ambiente (Barroso et al., 2019).

Puede presentarse en diversas formas químicas, siendo el cromo hexavalente el más tóxico y peligroso para la salud humana incluso para el medio ambiente, el cromo trivalente es esencial para los organismos en pequeñas cantidades, mientras que el cromo hexavalente es altamente tóxico además de carcinogénico (Sarria, 2020). La presencia de cromo hexavalente en el agua puede tener graves consecuencias para los ecosistemas acuáticos, incluso puede matar organismos acuáticos y afectar negativamente la biodiversidad hasta el equilibrio ecológico (Barroso et al., 2019).

La exposición al cromo puede tener efectos adversos en la salud, incluyendo problemas respiratorios, daño en el hígado y cáncer, por esta razón, es importante limitar la exposición al cromo y manejar adecuadamente los residuos que contienen cromo para proteger la salud humana y el medio ambiente (Quispe et al., 2019).

El cromo puede contaminar el agua a través de actividades industriales, como la producción de acero, galvanoplastia, curtido de cuero, y procesos de cromado, la liberación de

chromo hexavalente desde vertederos y sitios de disposición de residuos también es una fuente importante de contaminación (Núñez et al., 2018).

2.4.3 Plomo

Es un metal tóxico peligroso que puede ser encontrado en el medio ambiente en diversas formas, que puede ser liberado en el aire, agua y tierra como resultado de actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, la minería, la producción de químicos, y la eliminación de residuos tóxicos (Madueño & García, 2018).

Una vez liberado al ambiente, el plomo puede persistir durante décadas y afectar la salud humana y animal, alterando el funcionamiento de los sistemas nervioso, cardiovascular, inmunológico, reproductivo, y endocrino (Salas, 2021). La inhalación de partículas de plomo y el consumo de alimentos y agua contaminados son las principales vías de exposición al plomo en el medio ambiente (Uriña, 2022).

El plomo puede contaminar el agua desde diversas fuentes, como la corrosión de tuberías y accesorios de plomo en sistemas de distribución de agua, vertidos industriales, descargas de aguas residuales, y la escorrentía de sitios contaminados (Coronel, 2018). La presencia de plomo en el agua puede tener efectos negativos en los ecosistemas acuáticos y terrestres, puede ser tóxico para la vida acuática y dañar los hábitats naturales (Acosta & Alfonso, 2021)

A parte de ser altamente tóxico para los seres humanos, especialmente para los niños pequeños hasta las mujeres embarazadas, puede causar daño en el sistema nervioso, el cerebro, los riñones, afectar el desarrollo cognitivo y del comportamiento en los niños (Madueño & García, 2018).

2.5 Fitorremediación

La fitorremediación es una técnica de remediación ambiental que utiliza plantas para eliminar, degradar o inmovilizar contaminantes presentes en el suelo, el agua o el aire, por medio de sus tejidos a través de diversos procesos (Méndez et al., 2020). Incluso es un método respetuoso con el medio ambiente, ya que aprovecha procesos naturales, evitando la necesidad de excavaciones o el uso de productos químicos, además, puede ser una opción rentable en comparación con otras tecnologías de remediación (Mercado & Morales, 2021).

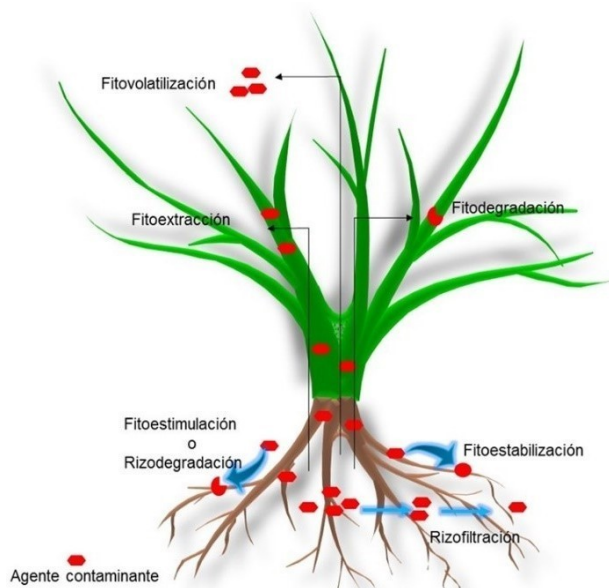
Aunque la fitorremediación tiene muchas ventajas, también tiene algunas limitaciones, puede ser un proceso lento, y en algunos casos, los contaminantes acumulados en las plantas deben ser adecuadamente eliminados o tratados para evitar la liberación posterior (Mercado & Morales, 2021).

Esta técnica se ha utilizado con éxito para remediar sitios contaminados por metales pesados, compuestos orgánicos, nutrientes, pesticidas y otros contaminantes en suelos agrícolas, áreas industriales, sitios de vertido de desechos y cuerpos de agua contaminados (Méndez et al., 2020). En el tratamiento de aguas residuales y remediación de aguas subterráneas, se aplica la fitorremediación mediante humedales construidos y plantas que eliminan contaminantes, el tratamiento de estas aguas se da por lirios de agua y juncos eliminando contaminantes en el medio (Tapia, 2007).

2.5.1 Tipos de fitorremediación

Estos mecanismos son esenciales para la capacidad de las plantas para actuar como agentes naturales de limpieza ambiental al abordar una variedad de contaminantes, incluso varían según el tipo de contaminante (Montano et al., 2022). En la **figura 4** se pueden apreciar los tipos de fitorremediación, con los diferentes procesos implicados en presencia de contaminantes.

Figura 6. Mecanismos de la fitorremediación frente a los contaminantes



Fuente: (Pilon-Smits, 2005)

- **Fitovolatilización:** Es el proceso mediante el cual las plantas emiten compuestos orgánicos volátiles (COVs) en la atmósfera, que pueden incluir una variedad de sustancias químicas, que las plantas liberan de forma natural como parte de su metabolismo, que se produce conforme los árboles y otras plantas en desarrollo absorben agua con contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos (Delgadillo et al., 2011).
- **Fitoestabilización:** Es una técnica que se utiliza para controlar o reducir la movilidad de contaminantes en el suelo, sin eliminarlos por completo, donde las plantas absorben los contaminantes del suelo a través de sus raíces y luego los inmovilizan dentro de su estructura o en el suelo circundante (Barton et al, 2005).
- **Rizodegradación:** Las plantas trabajan con microorganismos benéficos presentes en sus raíces para degradar o descomponer contaminantes orgánicos en el suelo en formas menos tóxicas, ya que, es especialmente efectiva para tratar contaminantes orgánicos, como hidrocarburos o compuestos orgánicos persistentes (Mendarte et al., 2021).
- **Fitodegradación:** Algunas plantas tienen la capacidad de degradar ciertos contaminantes químicos, ya sea directamente a través de sus raíces o mediante la

liberación de enzimas en el suelo que descomponen los contaminantes (Mercado & Morales, 2021).

- **Fitoextracción:** En este proceso, las plantas absorben los contaminantes del suelo o agua a través de sus raíces y los acumulan en sus partes aéreas, como hojas y tallos, posteriormente, las partes de la planta con altas concentraciones de contaminantes se cosechan y se eliminan adecuadamente, lo que permite la recuperación de los contaminantes del sitio (Neaman et al., 2021).
- **Rizofiltración:** En una técnica que implica el uso de plantas cuyas raíces tienen la capacidad de filtrar y retener contaminantes presentes en el agua o suelo, las raíces actúan como un filtro natural, atrapando los contaminantes antes de que puedan dispersarse en el medio ambiente (Peixoto, 2018). El agua contaminada es filtrada a través de la zona de la raíz, donde los contaminantes son absorbidos por las células de la raíz y metabolizados por la planta o acumulados en las células de la raíz (Sandoval, 2022).

Este proceso es utilizado para tratar aguas residuales y suelos contaminados por metales pesados y otros contaminantes, y es una alternativa más ecológica que los métodos tradicionales de tratamiento químico, la rizofiltración ha sido ampliamente estudiada y se ha demostrado que es efectiva en la eliminación de diferentes contaminantes en diferentes tipos de plantas (Llacza, 2018).

2.6 Mecanismo general de absorción de metales pesados de las macrofitas

La *L. minor* y *E. crassipes* son plantas acuáticas flotantes que tienen la capacidad de absorber metales pesados del agua circundante a través de un proceso llamado fitorremediación, este proceso implica varias etapas y mecanismos que permiten que estas plantas absorban y acumulen metales pesados de su entorno acuático (Gutierrez & Zapata, 2023). A continuación, se describe el mecanismo de acción general de absorción de metales pesados por parte de estas plantas:

- **Captura y adsorción:** Las raíces o raicillas sumergidas *L. minor* y *E. crassipes* tienen superficies cargadas negativamente que atraen a los iones metálicos cargados

positivamente presentes en el agua, los metales pesados se adhieren inicialmente a la superficie de las raíces debido a fuerzas de atracción electrostáticas (Pacheco, 2021).

- **Intercambio iónico:** Las plantas acuáticas liberan iones hidrógeno (H^+) en el medio circundante mediante la actividad de sus raíces, estos iones H^+ intercambian lugares con los metales pesados adheridos en la superficie de las raíces, desplazándolos y liberándolos en la solución circundante (Caja & Iannacone, 2021).
- **Transporte activo y pasivo:** Una vez que los metales pesados están en contacto con las raíces, pueden ingresar a las células de la planta a través de procesos de transporte activo y pasivo, el transporte activo involucra la utilización de energía para mover selectivamente los iones metálicos a través de las membranas celulares en contra de sus gradientes de concentración, el transporte pasivo aprovecha los gradientes de concentración para que los metales pesados entren en las células sin necesidad de gasto de energía adicional (Oliveros, 2022).
- **Acumulación y almacenamiento:** Una vez que los metales pesados han ingresado a las células de la planta, se acumulan en los espacios intercelulares y en compartimentos celulares especializados, como las vacuolas, las plantas acuáticas tienen la capacidad de almacenar cantidades significativas de metales pesados en estas estructuras, ayudando a reducir la concentración de metales en el agua circundante (Maldonado & Aparicio, 2021).
- **Bioacumulación y biomagnificación:** A medida que las plantas acuáticas absorben y acumulan metales pesados, pueden ser consumidas por organismos herbívoros acuáticos, los metales pesados pueden ser transferidos a través de la cadena alimentaria, lo que puede resultar en la bioacumulación y biomagnificación de estos metales en niveles tróficos superiores (Hellen, 2022).

Capítulo 3

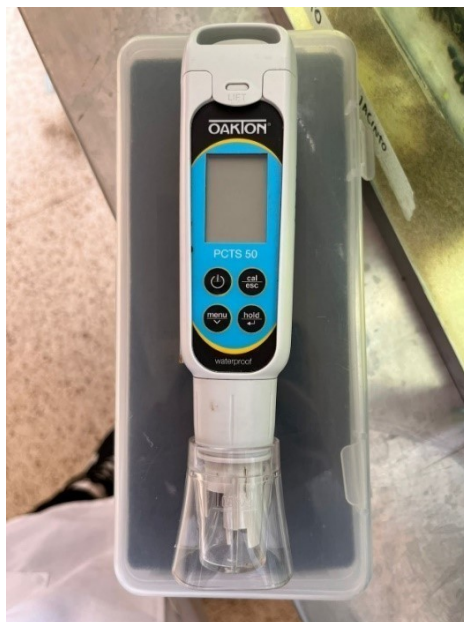
Materiales y métodos

3.1 Muestreo y análisis de agua estuarina

Se realizaron los siguientes análisis in situ, para recopilar los datos sobre la fuente de agua con el equipo multiparametro “MT01 OAKTON”

- pH
- TDS
- Conductividad

Figura 7. Equipo multiparámetro “MT01 OAKTON”



Fuente: (Zambrano, 2023)

Para recoger las muestras se utilizaron recipientes de 18 litros, a los cuales se les colocó una funda de basura esteril, luego se recogieron las muestras de agua en un solo punto, ubicado en el puente de la calle Victor Emilio Estrada y C. 9NO en Urdesa-Miraflores Guayaquil, con

un cabo atado a un recipiente estéril, se arrojó al agua y se recogieron las muestras, se procedió a llenar y a amarrar las fundas de los otros baldes para luego ser analizadas en el laboratorio.

Figura 8. Muestras de agua del Estero salado



Fuente: (Zambrano, 2023)

3.2 Recolección de las especies vegetales

Antes de recolectar las plantas de interés, nos aseguramos de identificar correctamente la planta, utilizando aplicaciones móviles de identificación de plantas. Para la selección de las plantas se tuvo en cuenta las siguientes características:

- Que estén en etapa de desarrollo
- Sin anomalías en su estructura.
- Buena pigmentación.
- Tanto para *E. crassipes* como para *L. minor* se eliminaron las partes que estaban estropeadas.

Al recolectar las plantas, para evitar que se dañen se utilizó una red de mano con malla fina, se sumergió la red en el agua y suavemente se recolectó la *E. crassipes* en el canal del colegio Tnte. Hugo Ortiz Garces, por otro lado la *L. minor* se obtuvo del reservorio de agua de la UPS campus María Auxiliadora sede Guayquil vía a la Costa Km 19,5. Una vez recogidas las

plantas se transfirieron en un recipiente y se lavaron con agua destilada para eliminar cualquier impureza como polvo, sedimentos o contaminante superficiales (Valer et al, 2014).

Figura 9. *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes* en su habitat



Fuente: (Zambrano, 2023)

Se procedio a analizar las dos especies vegetales con el equipo ‘‘Manual Of Chlorophyll Meter TYS-4N’’ las siguientes características de las especies vegetales:

- Clorofila
- Humedad
- Nitrogeno

Figura 10. Equipo ‘Manual Of Chlorophyll Meter TYS – 4N’

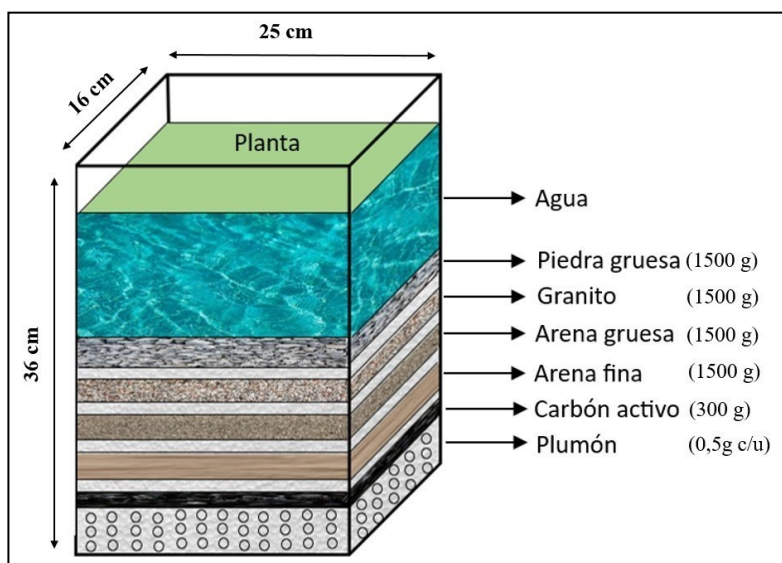


Fuente: (Zambrano, 2023)

3.3 Diseño de los biofiltros

Para el diseño del biofiltro se utilizó acrílico transparente de 3 mm de grueso, para esto se utilizaron las siguientes medidas: 36 cm de altura, 16 cm ancho y 25 cm de largo. Se pegó cada uno de sus lados con super blonder y silicon para vidrio de la marca Sikasil AC, una vez seco, en la base se realizan orificios de 3 mm, hasta los 5 cm de altura para permitir la recirculación, seguido de esto se le agregó 6 capas de plumón recortados a la medida interna, 300 g de carbon activo, una capa de plumón, 1500 g de arena fina, una capa de plumón, 1500 g de arena gruesa, una capa de plumón, 1500 g de piedras pequeñas (granito), una capa de plumón y 1500 g de piedra gruesa como se puede apreciar en la **figura 13**.

Figura 11. Prototipo del biofiltro



Fuente: (Zambrano, 2023)

- **Piedra gruesa:** Su función es retener sólidos y ayudar a distribuir uniformemente el flujo de agua a lo largo del filtro.
- **Granito:** Proporciona una superficie rugosa para el crecimiento de bacterias beneficiosas, estas bacterias descomponen los contaminantes orgánicos presentes en el agua, convirtiéndolos en compuestos más simples y menos dañinos.
- **Arena gruesa:** Ayuda a retener partículas más grandes y a proporcionar una mayor superficie para el crecimiento de bacterias beneficiosas.
- **Arena fina:** Su función principal es actuar como medio filtrante, atrapando partículas suspendidas y sólidos en el agua. La arena fina tiene una textura más suave y es capaz de retener partículas más pequeñas que las piedras.
- **Carbón activo:** Adsorbe sustancias químicas y compuestos orgánicos presentes en el agua, tiene una alta porosidad que le permite atrapar y retener moléculas no deseadas, mejorando así la calidad del agua tratada.
- **Plumón:** Sirve para retener partículas y partículas sólidas suspendidas en líquidos o gases. Su función principal en un filtro es la de un medio de filtración, también actúa como una barrera física para evitar que los materiales anteriores se mezclen con el agua tratada.

Para el diseño de los recipientes se utilizó vidrio, se trabajó con las siguientes medidas: 36,5 cm de ancho, 47 cm de largo y 36 cm de alto. De igual manera que el biofiltro, se procedió a unir todas las partes con silicon de la marca Sikasil AC transparente para vidrio y para reforzar se le adhirió un ángulo de aluminio en todos los bordes como se observa en la **figura 14**.

Figura 12. Recipiente de vidrio



Fuente: (Zambrano, 2023)

3.4 Tratabilidad del agua

Se utilizaron dos tamices para eliminar las partículas grandes, como hojas, sedimentos y otros desechos sólidos, para proteger las etapas siguientes del tratamiento de cualquier materia orgánica, las cuales podrían obstruir la bomba de agua.

Para aglutinar partículas pequeñas y coloides en floculos más grandes del agua, se agregó el coagulante químico sulfato de aluminio al 1%. Luego, se utilizó el agente floculante policloruro de aluminio para unir estos floculos en partículas más grandes y pesadas, luego de agregar los reactivos se mezcló por 5 minutos a velocidad baja para evitar romper los floculos pasados ese tiempo se dejó sedimentar. Una vez sedimentado los floculos se pasó el agua tratada a través de una bomba de agua a un recipiente, dejando los floculos en el fondo, debido a la gravedad.

3.5 Cuantificación de metales pesados en agua y las especies *L. minor* y *E. crassipes*

Se limpiaron cuidadosamente todos los recipientes que se utilizaron para evitar contaminaciones cruzadas, con jabon neutro, alcohol al 76%, Extran rebajado, ácido nítrico (HNO₃) libre de metales al 2% y agua tipo 1.

Materiales

- Vasos de precipitación de 250 ml
 - Tubos de digestión de teflon
 - Probetas de 100 ml
 - Pipeta de 10 ml
 - Matraces Büchner
 - Matraces aforados
 - Embudo de vidrio
 - Tubos de ensayo

3.5.1 Digestión ácida

Para la digestión del agua se tomó 100 ml de la muestra en una probeta, luego se traspaso a un vaso de precipitación de 250 ml. Dentro de una campana de extracción se le agregó 2 ml de ácido nítrico libre de metales concentrado y se calentaron las muestras en una plancha de calentamiento a 100°C hasta que se reduzca a 10 ml (EPA, 2018). Una vez obtenido los 10 ml se dejó enfriar las soluciones digestivas, seguido de esto, se filtro cualquier residuo sólido que pudo haber quedado utilizando un embudo con papel filtro. Se diluyó la solución digestiva con agua tipo 1 hasta enrazar en un matraz volumetrico aforado de 100 ml para que esté dentro del rango de medición del equipo, se traspasaron las soluciones a frascos ambar de vidrio y se etiqueto, luego se guardaron hasta su respectivo analisis en el ICP-OES.

3.6 Digestión por microondas para material vegetal

Para la digestión de las plantas se seleccionó muestras de las plantas que sean representativas de la población en el caso de la *E. crassipes* sus raíces, mientras que la *L. minor*

se recogio todo, luego se secaron las macrofitas en la estufa a una temperatura controlada de 70 °C por 24 horas hasta alcanzar un peso seco constante. Esto permitio que la medición de la biomasa sea precisa. Se redujeron las muestras a un tamaño uniforme y homogéneo con la ayuda de un mortero.

Se peso 0,5 g de la muestra en un vidrio de reloj sobre una balanza de precision, luego se colocaron en los tubos de digestión. Una vez colocadas las muestras en lo tubos se agrego en cada uno 10 ml de ácido nítrico al 70%, se tapo y sello bien los tubos de digestión para evitar pérdidas de muestra durante la digestión (CEM, 2019). Luego se colocaron los tubos en el equipo de digestión por microondas “MARS 6” modelo 230/60 de la marca CEM como se observa en la **figura 15** y se siguio las instrucciones del fabricante para configurar el programa de digestión. Esto incluyo ajustes de temperatura y tiempo de digestión.

Después de la digestión, se deajo enfriar los recipientes a temperatura ambiente antes de abrirlo, para aliviar cualquier presión acumulada con el respectivo cuidado. Se procedio a filtrar, en lugar de enrazar con agua tipo 1, se utilizo acido nitrico al 2%, luego se traspaso a frascos ambar de vidrio.

Figura 13. Equipo de digestion por microondas “MARS 6” modelo 230/60 de la marca CEM

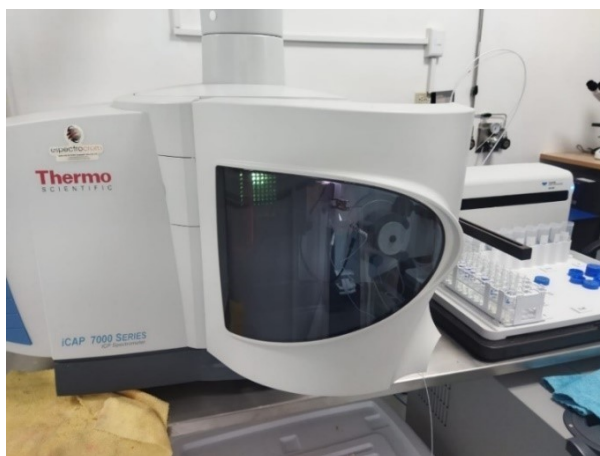


Fuente: (Zambrano, 2023)

3.6 Cuantificación de metales pesados por medio de ICP-OES

Se calibró el Equipo ICP-OES “iCAP 7000 SERIES ICP Spectrometer” de la marca Thermo SCIENTIFIC de la **figura 16**, utilizando estándares de referencia certificados que contenían los metales pesados de interés (Cd, Cr, Pb) en concentraciones conocidas. Luego se transfirieron las soluciones digestiva a tubos de ensayo para su posterior análisis, donde se introdujeron las soluciones diluidas en el ICP-OES, el cual detectó y cuantificó los metales pesados presentes en las muestras.

Figura 14. Equipo ICP-OES “iCAP 7000 SERIES ICP Spectrometer” de la marca Thermo SCIENTIFIC



Fuente: (Zambrano, 2023)

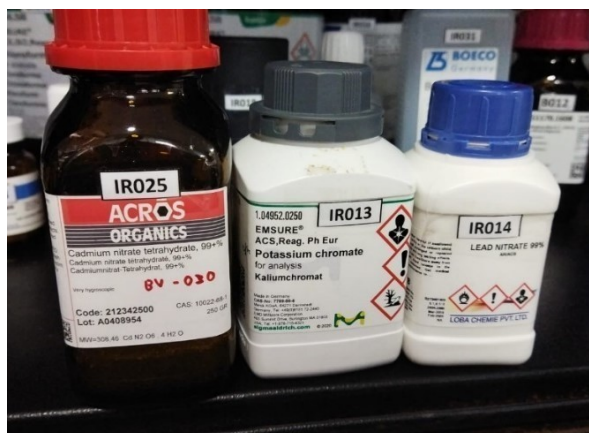
3.7 Biorremediación de metales pesados por rizofiltración

3.7.1 Adición de metales pesados a las muestras de agua del Estero salado

Se seleccionaron las siguientes sales:

- Nitrato de cadmio tetrahidratado ($\text{CdH}_2\text{N}_2\text{O}_6$) al 99%
- Cromato de potasio (K_2CrO_4) al 100%
- Nitrato de plomo ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) al 99%

Figura 15. Sales con metales pesados



Fuente: (Zambrano, 2023)

Se pesó una cantidad precisa de las sales de metal pesado, utilizando una balanza analítica o balanza de precisión, esto después de que se calculó la cantidad de sal de acuerdo con la concentración en ppm deseado, por medio de la siguiente ecuación de dilución de soluciones concentradas (Rodríguez, 2017).

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

Luego de haber obtenido los calculos y haber pesado las sales, en un matraz aforado se agregó la sal y agua destilada para disolver la cantidad medida de la sal de metal pesado. Para homogenizar se utilizó un agitador magnético para asegurar que la sal se disuelva completamente en el agua.

Una vez obtenida las soluciones con los metales pesados preparados, se adicionó el volumen deseado de cada sal en los recipientes con la muestra de agua a la que se le realizara el tratamiento. Se tomo una alícuota de cada recipiente para saber si la concentración final es la deseada, por medio del análisis ICP-OES.

3.7.2 Condiciones de tratamiento

Se colocó una bomba de aire y una bomba de recirculación en cada uno de los recipientes, también una luz fluorescente para brindar luz necesaria a las plantas por durante 18 horas usando un timer. La bomba de agua permitió que el agua recircule por el biofiltro, este se puso

a velocidad maxima, la bomba de aire permitio la oxigenacion del agua para que el este no se empiece a deteriorar por lo cual solo se abrio termino medio la valvula, y la luz fluorescente se coloco de manera que todos los recipientes recibieran la misma cantidad de luz.

Para asegurar la supervivencia de las plantas, se adiciono el macronutriente acualeaf MACROS de la marca deacua de 240 ml de la **figura 18** y luego se mezclo con el agua hasta homogenizar, para saber cuanto se tenia que agregar, se leyo la descripcion del producto que nos dice que para 100 litros de agua se debe agregar 20 ml del mismo, entonces se procedio a hacer una regla de 3:

$$100 \text{ l} = 20 \text{ ml}$$

$$36 \text{ l} = X \text{ ml}$$

$$X \text{ ml} = \frac{36 \text{ l} * 20 \text{ ml}}{100 \text{ l}} = 7,2 \text{ ml}$$

7,2 ml por cada 36 litros

Según las intrucciones del fabricante este producto esta compuesto por:

- Nitrato (NO₃) 5%
- Fosfato (PO₄) 0,5%
- Potasio (K) 5%

Figura 16. Macronutriente ‘acualeaf MACROS’ de la marca deacua de 240 ml



Fuente: (Zambrano, 2023).

3.7.2 Implementacion del biofiltro expuesto al agua contaminada

Se colocaron los biofitros en los 3 primeros recipientes mientras que el cuarto recipiente fue el de control. Una vez nivelado el volumen del agua se colocaron las plantas de la siguiente manera:

- Recipiente 1: *L. minor* (24,9 g)
- Recipiente 2: *E. crassipes* (8 jacintos)
- Recipiente 3: Las dos especies vegetales *L. minor* (10 g) y *E. crassipes* (6 jacintos)
- Recipiente 4: Control (sin ninguna especie vegetal)

3.7.3 Monitoreo y control

Para el agua se hicieron los siguientes análisis físicos químicos

- Se determinó pH, conductividad, sólidos totales (TDS) y salinidad cada 3 días por 15 días.
- Se determinó el oxígeno disuelto (OD) al inicio y al final.

- Se cuantifico al inicio y al final la concentracion de mateles pesados (Cd, Cr y Pb).
- Se observo el aspecto del agua al final del tratamiento.

Para el analisis de las plantas se hicieron los siguientes analisis tanto fisico como quimicos

- Se peso al inicio y al final el peso en humedo de la lentaje de agua.
- Se conto al inicio y final las raices del jacinto de agua.
- Se determinar la cantidad de clorofila, nitrogeno, humedad y temperatura cada 3 días por 15 días.
- Se cuantifico al final la absorcion de metales pesados (Cd, Cr, y Cd) por las plantas.
- Se observo si la planta tiene alguna afeccion morfologica despues del tratamiento del agua.

Capítulo 4

Resultados y Discusiones

4.1 Muestreo y análisis de agua estuarina

En la **tabla 7**, se presentan los valores iniciales de los parámetros obtenidos durante la toma de muestras in situ en el Estero Salado, tal como se ilustra en la **figura 27**, donde se observa que el pH se situó en 7,35, la conductividad alcanzó los 3340 $\mu\text{s}/\text{cm}$, los TDS se registraron en 1210 ppm. Estos parámetros revisten una importancia significativa en la evaluación de la calidad del agua, ya que ofrecen indicios sobre la posible presencia de contaminantes y la capacidad del agua para sustentar la vida acuática, en una investigación realizada en Ecuador, se puede apreciar que el pH en los diferentes puntos no difiere, ya que se mantienen en un rango 7 aproximadamente, por otro lado lo que es TDS y CE fueron relativamente bajas en comparación con el nuestro punto de muestreo con 29,35 ppm de TDS y 564,16 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (Rodríguez et al., 2018).

Tabla 7. Medición inicial de los parámetros del agua

Parámetro del agua	Valor inicial
pH	7,35
Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	3340
TDS (ppm)	1210

Fuente: (Zambrano, 2023)

4.2 Recolección de las especies vegetales

Se recolectaron 100 gramos de *Lemna minor* y 25 de *E. crassipes*, todas ellas en un estado de salud óptimo, como se puede apreciar claramente en la **figura 11**. Posteriormente, se procedió a lavarlas con agua de tipo 1, lo cual permitió eliminar la mayoría de las impurezas.

Al examinar los resultados de los parámetros iniciales de las plantas, se destacaron diferencias significativas entre *L. minor* y *E. crassipes*, como se detalla en la **tabla 8**. *L. minor* presentó niveles más bajos de clorofila, registrando 21.32 unidades SPAD, y una menor concentración de nitrógeno, con un valor de 9.45 mg/g, en una investigación realizada en la

ciudad de Riobamba-Ecuador nos dice que *L. minor* contenía 0,93 g/mg, lo cual fue un contenido de nitrógeno más bajo en comparación con *E. crassipes* (Sarango & Sanchez, 2016). Además, se observó que *L. minor* tenía un contenido de humedad más bajo en sus tejidos, alcanzando un 38% de humedad relativa (RH%), en contraste con *E. crassipes*.

Tabla 8. Medición inicial de los parámetros de la *L. minor* y *E. crassipes*

Parámetro inicial	<i>L. minor</i>	<i>E. crassipes</i>
Clorofila (SPAD)	21,32	52,8
Nitrógeno (mg/g)	9,45	19,2
Humedad (RH %)	38	76,5

Fuente: (Zambrano, 2023)

4.3 Diseño de los biofiltros

Se sometió a prueba tanto el recipiente como el biofiltro para evaluar su capacidad de resistir el volumen de agua requerido, que en este caso fueron 36 litros. Los resultados demostraron que tanto el recipiente como el biofiltro pudieron soportar dicho volumen sin ningún inconveniente. No se observaron movimientos ni desplazamientos de los componentes del biofiltro durante las pruebas.

Además, durante el proceso de recirculación del agua mediante la bomba, no se produjo ningún desbordamiento del biofiltro. Las plantas se mantuvieron flotando en la superficie del agua y no entraron en contacto con las piedras del biofiltro, lo que evidenció la efectividad del diseño propuesto.

Un resultado significativo de estas pruebas es que se logró eliminar el color negro que previamente estaba presente debido al uso del carbón activado. Esto indica que el sistema implementado cumplió con éxito su objetivo de purificación del agua al eliminar las sustancias que causaban el color no deseado, además el diseño de biofiltro de Sarango & Sánchez (2016), también obtuvo buenos resultados a pesar de que su diseño está fuera del recipiente.

Figura 17. Diseño del biofiltro



Fuente: (Zambrano, 2023).

4.4 Tratabilidad del agua

Al utilizar los dos tamices en el proceso de filtración, se logró retener eficazmente toda la materia orgánica que estaba presente en el agua, tal como se puede apreciar claramente en la **figura 19**. Este resultado indica que el sistema de filtración fue altamente efectivo en la eliminación de la materia orgánica del agua (Lorenzo, 2006).

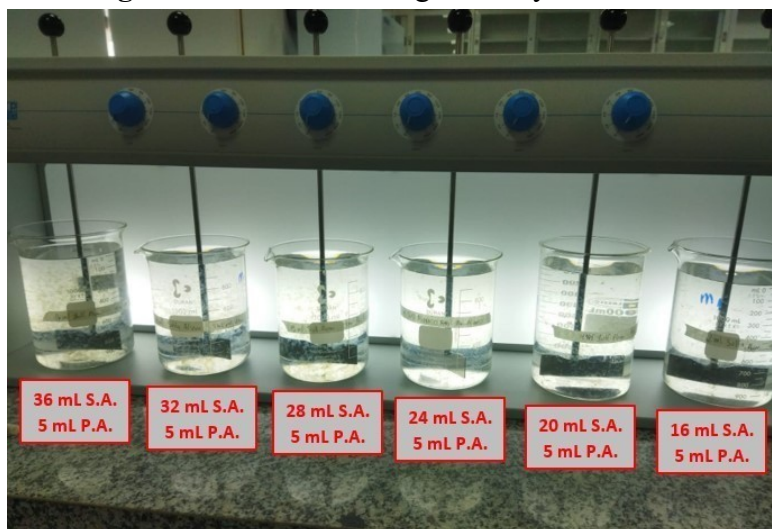
Figura 18. Filtración gruesa de la muestra de agua



Fuente: (Zambrano, 2023)

Previo a realizar los cálculos de concentraciones, se realizó una evaluación para determinar el volumen óptimo necesario para coagular los flóculos por cada litro de solución. Se destacó que el recipiente en el que se añadieron 36 ml de sulfato de aluminio a 1000 ml de la muestra resultó ser el más efectivo, como se puede apreciar en la **figura 20**. Esto indica que esta proporción específica de sulfato de aluminio y muestra de agua produjo los resultados más satisfactorios en términos de coagulación de los flóculos (Aguilar, 2002).

Figura 19. Prueba de coagulación y floculación



Fuente: (Zambrano, 2023)

Una vez determinado el volumen óptimo, se procedió a realizar los cálculos correspondientes y luego se añadieron al total de 36 litros de agua. Fue evidente que la cantidad de sulfato de aluminio al 1% y policloruro de aluminio al 1% añadida fue la correcta, ya que, como se puede apreciar en la **figura 21**, los flóculos se sedimentaron y el agua se clarificó satisfactoriamente.

Sulfato de aluminio al 1%

$$1 L = 36 \text{ ml de sulfato de aluminio}$$

$$36 L = X \text{ ml de sulfato de aluminio}$$

Regle de 3

$$\frac{36 * 36}{1} = 1296 \text{ ml de sulfato de aluminio}$$

Policloruro de aluminio

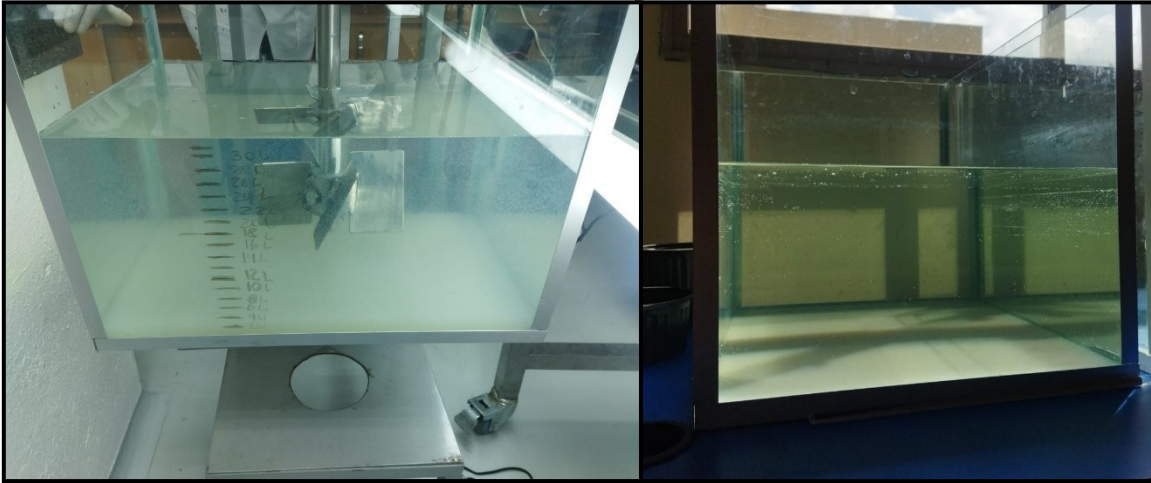
$$1 L = 5 \text{ ml de policloruro de aluminio}$$

$$36 L = X \text{ mL de policloruro de aluminio}$$

Regle de 3

$$\frac{36L * 5\cancel{ml}}{1L} = 180 \text{ mL de sulfato de aluminio}$$

Figura 20. Coagulación y floculación por cada 36 litros de agua



Fuente: (Zambrano, 2023)

4.5 Cuantificación de metales pesados en agua y las especies *L. minor* y *E. crassipes*

Como se puede apreciar en la **tabla 9** en la primera lectura, se realizaron tres repeticiones de una misma muestra de agua. Esto se debió a que el agua fue tomada de un único punto, y al analizar la muestra, se pudo determinar que el agua del Estero Salado se encontraba en el límite permisible según las regulaciones del Ministerio de Ambiente del Ecuador (2015), como se observa en el anexo 1.

Tabla 9. Concentración inicial de metales pesados de la muestra de agua del estero salado

Metal pesado	Valor inicial ppm
Cadmio	0
Cromo	0,005
Plomo	0,015

Fuente: (Zambrano, 2023)

4.6 Adición de sales con metales

Para evaluar la eficacia de las plantas, se incrementó la concentración de metales pesados mediante la adición de sales como se hizo en la investigación en la ciudad de Cuenca-Ecuador (Jaramillo & Flores, 2012). Para llevar a cabo este proceso, se realizaron los cálculos correspondientes y luego se añadieron las sales a cada recipiente. Es relevante mencionar que una de las sales tenía un color amarillo, lo que causó que el agua adquiriera un tono similar, como se puede observar en la **figura 22**.

Nitrato de cadmio tetrahidratado (concentración deseada 1 ppm)

Calculo para la cantidad de sal en una solución de 1000 ml:

$$1 \text{ g Cd} * \frac{238,44 \text{ g CdH}_2\text{N}_2\text{O}_6}{112,411 \text{ g Cd}} = 2,1211 \text{ g CdH}_2\text{N}_2\text{O}_6$$

$$\frac{2,1211}{0,99} = 2,1424 \text{ g CdH}_2\text{N}_2\text{O}_6$$

Calculo para el volumen (ml) que se tomara de la solución:

$$1000 \text{ ppm} * V_1 = 1 \text{ ppm} * 36 \text{ l}$$

$$V_1 = \frac{1 \text{ ppm} * 36 \text{ l}}{1000 \text{ ppm}}$$

$$V_1 = 0,036 \text{ l}$$

$$0,036 \text{ l} = 36 \text{ ml de la solución}$$

Cromato de potasio (concentración deseada 3 ppm)

Calculo para la cantidad de sal en una solución de 1000 ml:

$$1 \text{ g Cr} * \frac{198,1896 \text{ g K}_2\text{CrO}_4}{51,9161 \text{ g Cr}} = 3,7646 \text{ g K}_2\text{CrO}_4$$

Calculo para el volumen (ml) que se tomara de la solución:

$$1000 \text{ ppm} * V_1 = 3 \text{ ppm} * 36 \text{ l}$$

$$V_1 = \frac{3 \text{ ppm} * 36 \text{ l}}{1000 \text{ ppm}}$$

$$V_1 = 0,108 \text{ l}$$

0,108 l = 108 ml de la solución

Nitrato de plomo (concentración deseada 2 ppm)

Calculo para la cantidad de sal en una solución de 1000 ml:

$$1 \text{ g Pb} * \frac{331,2 \text{ g Pb(NO}_3)_2}{207,2 \text{ g Pb}} = 1,5984 \text{ g Pb(NO}_3)_2$$

$$\frac{1,5984}{0,99} = 1,6114 \text{ g Pb(NO}_3)_2$$

Calculo para el volumen (ml) que se tomara de la solución:

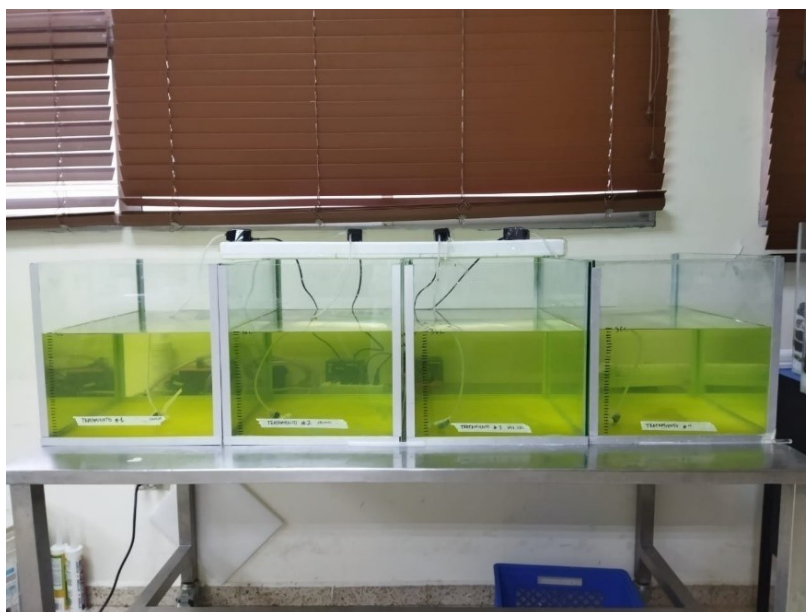
$$1000 \text{ ppm} * V_1 = 2 \text{ ppm} * 36 \text{ l}$$

$$V_1 = \frac{2 \text{ ppm} * 36 \text{ l}}{1000 \text{ ppm}}$$

$$V_1 = 0,072 \text{ l}$$

0,072 l = 72 ml de la solución

Figura 21. Adición de sales con metales pesados



Fuente: (Zambrano, 2023)

4.7 Cuantificación de metales pesados en la muestra repotenciada por sales

Al analizar las muestras de agua de cada recipiente, se observó que los resultados obtenidos no coincidieron con las expectativas previas. No obstante, al consultar la **tabla 10**, se pudo constatar que el contenido de metales pesados sí experimentó un aumento. Vale la pena señalar que, en particular, el plomo mostró una varianza significativamente más alta, registrando un valor de 0,031 en comparación con el cadmio y el cromo, que presentaron una varianza de 0,002, según se evidencia en la **tabla 16**.

Tabla 10. Concentración de metales pesados de los 4 recipientes

Tratamientos	Cadmio ppm	Cromo ppm	Plomo ppm
1	0,263	1,117	0,220
2	0,250	1,111	0,246
3	0,208	1,125	0,322
Control	0,217	1,208	0,608

Fuente: (Zambrano, 2023)

4.8 Biorremediación de metales pesados por rizofiltración

4.8.1 Condiciones del tratamiento

Los biofiltros fueron instalados y las bombas se encendieron simultáneamente, destacando que todas funcionaron sin inconvenientes. Además, la iluminación se distribuyó de manera uniforme en los cuatro recipientes, proporcionando la cantidad necesaria de luz para cada uno. Cuando se añadieron las plantas, estas se integraron de forma adecuada en los biofiltros, sin presentar ningún problema, como se puede apreciar en la **figura 22**.

Figura 22. Condiciones del tratamiento



Fuente: (Zambrano, 2023)

4.9 Monitoreo y control

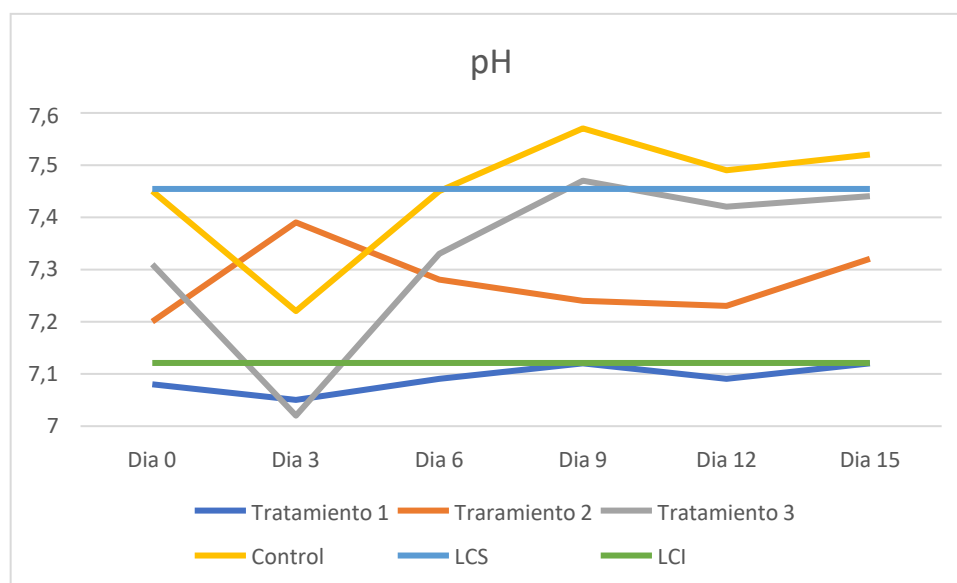
Comportamiento del agua

Los resultados del pH revelan diferencias notables en los niveles de pH entre los tratamientos y el grupo de control. En los 15 días del tratamiento hubo cambios del pH que estuvieron fuera del control, como se puede apreciar en la **gráfica 1**.

El Tratamiento 1 mostró la menor desviación estándar, lo que sugiere una menor variabilidad en los valores de pH. Por el contrario, el Tratamiento 3 presentó la mayor desviación estándar con 0,02725 con un pH de entre 7,09 y 7,45 como se detalla en la **tabla 17**,

en una investigación de la Universidad Peruana Unión los valores del pH tampoco difirieron, sin embargo, fue un pH más alto, siendo de 8,2 (Quispe et al., 2017).

Gráfica 1. Comportamiento del pH en los 15 días de estudio del tratamiento

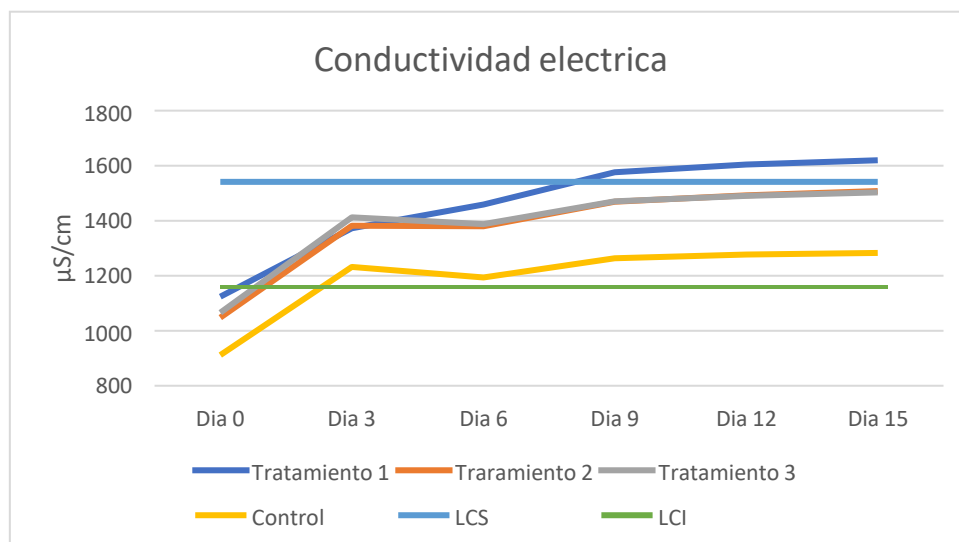


Fuente: (Zambrano, 2023)

Los datos de conductividad registrados en los cuatro tratamientos muestran diferencias notables en sus características. En algunos días los límites de control se salieron del rango como se puede observar en la **gráfica 2**, en el día 1 todos los tratamientos se salieron del límite, y el día 9 solo el tratamiento 1, en la investigación realizada en Perú la conductividad fue de 495 $\mu\text{S}/\text{cm}$ mientras que la de nuestro experimento vario 1193,67 a 1459,33 $\mu\text{S}/\text{cm}$ siendo una conductividad más alta, no obstante, es su estudio no hubo diferencia significativa (Quispe et al., 2017).

Estos resultados sugieren que el Tratamiento 1 experimentó una mayor variabilidad en los niveles de conductividad en comparación con los otros tratamientos como se puede observar en la **tabla 18**.

Gráfica 2. Comportamiento de la conductividad eléctrica en los 15 días de estudio del tratamiento



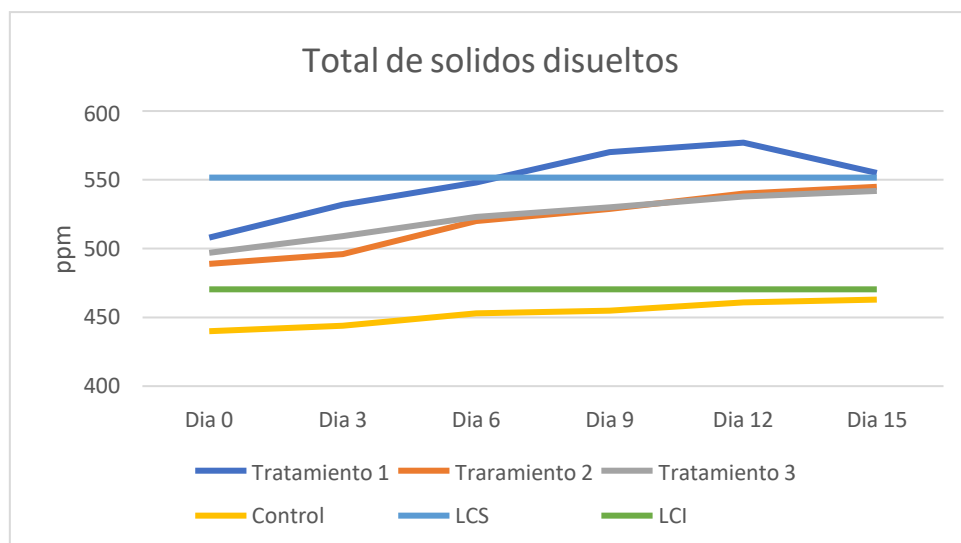
Fuente: (Zambrano, 2023)

En los TDS se muestran diferencias notables en la concentración entre los tratamientos y el grupo de control. En la **gráfica 3** podemos observar como el grupo control es el único que está fuera de limite en todos los días del experimento, mientras que el tratamiento 1 solo estuvo fuera del rango entre los días 9 y 12.

El Tratamiento 1 mostró la mayor desviación estándar, lo que sugiere una mayor variabilidad en la concentración de sólidos disueltos. Por el contrario, el grupo de Control tuvo la menor desviación estándar, lo que indica una menor variabilidad en este parámetro en particular como se detalla en la **tabla 19**.

Los resultados de las pruebas realizadas en Perú con el filtro físico y el filtro biológico demostraron una notable disminución en los niveles de Sólidos Totales Disueltos (TDS) en el agua tratada, reduciéndolos de 3,266 ppm a 2.55 ppm. Esta diferencia entre los tratamientos fue estadísticamente significativa. En el caso específico de mi diseño de biofiltro, se logró una reducción con los niveles de TDS disminuyendo de 1210 ppm a 551.61 ppm (Morales et al, 2020).

Gráfica 3. Comportamiento de TDS electrica en los 15 días de estudio del tratamiento



Fuente: (Zambrano, 2023)

Los valores finales de la CE y TDS disminuyeron notoriamente en comparación con los valores iniciales como se puede observar en **tabla 11** a diferencia de pH que no tuvo una diferencia notoria.

Tabla 11. Comparación de valor inicial y final de los parámetros del agua

Parámetros valor final	V.I	Tratamiento 1	Tratamiento 2	Tratamiento 3	Control
pH	7,35	7,12	7,32	7,44	7,52
Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	3340	1620	1508	1503	1283
TDS (ppm)	1210	555	545	542	463

Fuente: (Zambrano, 2023)

4.10 Remoción de metales pesados en el agua

Los resultados del estudio indican que tanto *L. minor* como *E. crassipes* son altamente eficientes en la remoción de metales pesados del agua del Ramal B del Estero Salado. Las tasas de remoción de cadmio (Cd) fueron del 98.48% para *L. minor*, del 98.40% para *E. crassipes* y del 98.56% para la combinación de ambas plantas como se observa en la **tabla 12**. En una investigación de la Universidad Nacional Federico Villareal el porcentaje de remoción de Cd fue de 92,7% (Hellen, 2022). En otra investigación de la Universidad Cesar Vallejo se demostró que la *E. crassipes* absorbió hasta el 94,64% de cadmio dentro de 21 días, mientras que en el presente estudio se logró absorber hasta el 98,56% de cadmio en un lapso de 15 días demostrando una mejor eficacia del uso de estas plantas en sinergia con los elementos del biofiltro (Muñoz, 2019).

Tabla 12. Remoción de cadmio del agua en los 3 tratamientos

Tratamientos	C. I. Cadmio ppm	C. F. Cadmio ppm	% de remoción
<i>L. minor</i>	0,263	0,004	98,48
<i>E. crassipes</i>	0,250	0,004	98,40
<i>L. minor</i> más <i>E. crassipes</i>	0,208	0,003	98,56

Fuente: (Zambrano, 2023)

En cuanto al cromo (Cr), *L. minor* mostró una tasa de remoción del 31.42%, mientras que *E. crassipes* alcanzó un 68.41%, véase en la **tabla 13**, esto se puede corroborar con la investigación de Gutierrez & Zapata (2023) que nos dice que mejor remoción tubo la *E. crassipes* con un 76,72% en comparación con la *L. minor* que logro absorber hasta el 52,71%, sin embargo, en nuestra investigación mejor remoción de cromo tubo la sinergia de estas plantas.

Tabla 13. Remoción de cromo del agua en los 3 tratamientos

Tratamiento	C. I. Cromo	C. F. Cromo	% de remoción
<i>L. minor</i>	1,117	0,766	31,42
<i>E. crassipes</i>	1,111	0,351	68,41
<i>L. minor</i> más <i>E. crassipes</i>	1,125	0,114	89,87

Fuente: (Zambrano, 2023)

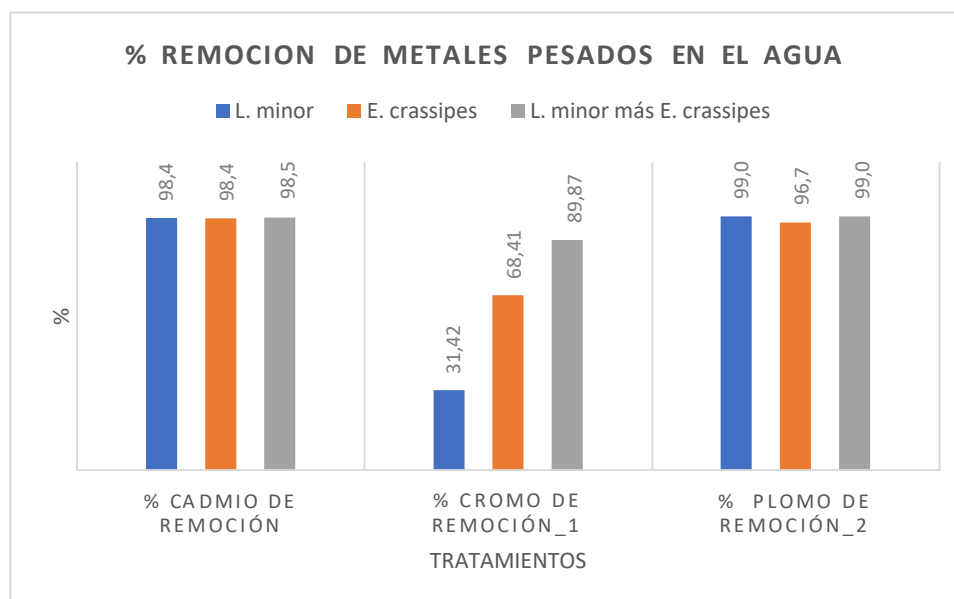
La combinación de *L. minor* y *E. crassipes* exhibió una sorprendente tasa de remoción del 89.87%. En el caso del plomo (Pb), *L. minor* logró una remoción del 99.09%, *E. crassipes* del 96.75%, y la combinación del 99.07% como se observa en la **tabla 14**. Estos resultados reflejan la eficacia de ambas plantas con el biofiltro en el proceso de fitorremediación de metales pesados, como se detalla en la **gráfica 4**. Sin embargo, en un artículo de Sustainability (Ali et al., 2022) reporta que el Pb fue removido hasta 50%, el Cd incluso un 90% y 89% el Cr.

Tabla 14. Remoción de cadmio del agua en los 3 tratamientos

Tratamiento	C. I. Plomo	C. F. Plomo	% de remoción
<i>L. minor</i>	0,220	0,002	99,09
<i>E. crassipes</i>	0,246	0,008	96,75
<i>L. minor</i> más <i>E. crassipes</i>	0,322	0,003	99,07

Fuente: (Zambrano, 2023)

Gráfica 4. Porcentaje de remoción de metales pesados en el agua



Fuente: (Zambrano, 2023)

4.11 Aspecto del agua

Después de tres días de implementación del experimento, se pudo notar que el Tratamiento 3 ya estaba absorbiendo metales pesados, con un enfoque especial en el cromo. Esto se evidenció por el cambio de color en la sal de cromo añadida a los recipientes, que inicialmente dejó un tono amarillo. Sin embargo, con el tiempo, se observó que esta tonalidad amarilla estaba disminuyendo, lo que sugiere que el Tratamiento 3 estaba siendo efectivo en la reducción de la concentración de cromo en el agua. Este resultado es prometedor y sugiere que el tratamiento estaba logrando su objetivo de adsorber y reducir la presencia de metales pesados en el agua.

Al finalizar el experimento se observó que los tratamientos 2 y 3 eliminaron por completo la tonalidad amarilla inicial como se observa en la **figura 25**. Esto sugiere una efectiva remoción de metales pesados. Estos resultados tienen implicaciones prometedoras para la purificación de aguas y suelos contaminados con metales pesados y destacan la capacidad de las plantas acuáticas en este proceso.

Figura 23. Día 15 del tratamiento



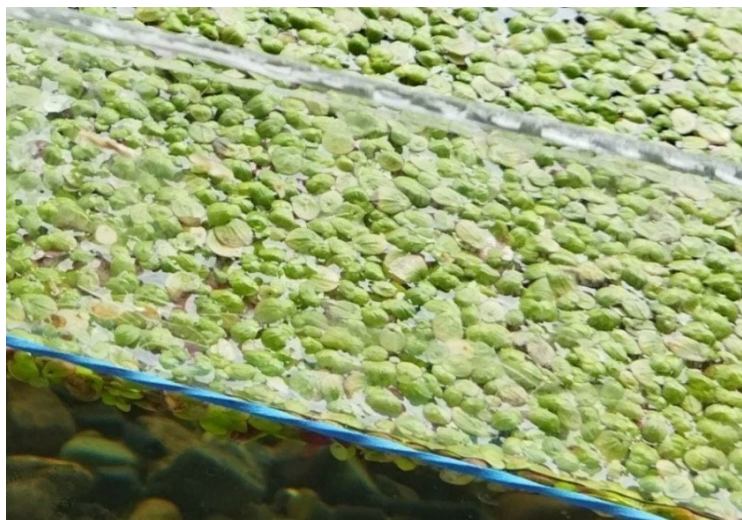
Fuente: (Zambrano, 2023)

4.12 Aspecto de las plantas

Se observó que *L. minor* experimentó cambios en su estructura, como se puede apreciar en la **figura 24**, donde se evidenció la presencia de clorosis. Por otro lado, *E. crassipes* mostró signos de marchitamiento como se observa en la **figura 25**, lo que difiere de los resultados obtenidos en la investigación de, según una investigación de la Universidad Politécnica Salesiana de la sede cuenca, que nos dice que la *E. crassipes* presento necrosis en su morfología (Jaramillo & Flores, 2012).

Estos cambios en la estructura de las plantas, como la clorosis en *L. minor* y el marchitamiento en *E. crassipes*, pueden indicar respuestas a las condiciones ambientales o a los tratamientos aplicados en el estudio. La clorosis, por ejemplo, a menudo está relacionada con una deficiencia de nutrientes o problemas en la fotosíntesis de la planta. El marchitamiento, por otro lado, puede estar relacionado con el estrés hídrico o condiciones ambientales adversas (Ansari et al, 2020).

Figura 24. Clorosis en *L. minor*



Fuente: (Zambrano, 2023)

Figura 25. Marchitamiento en la *E. crassipes*



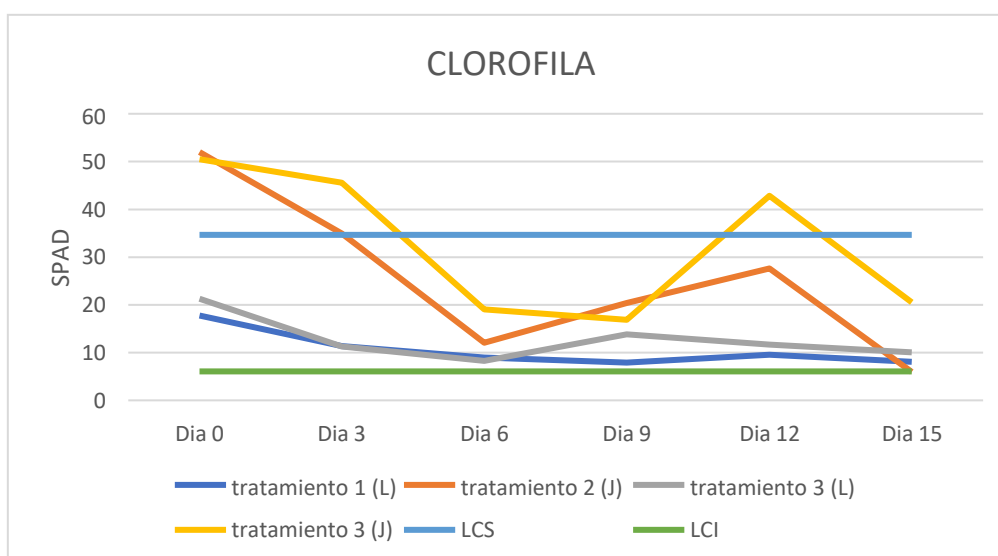
Fuente: (Zambrano, 2023)

4.14 Comportamiento de los parámetros de las plantas

Los datos de concentración de clorofila en los diferentes tratamientos revelan patrones notables, en la **gráfica 5** se muestra como la *E. crassipes* en los tratamientos 2 y 3 se sale del límite de control. Es importante destacar que la variabilidad en los resultados también es notable. Los tratamientos con *E. crassipes* presentan una variabilidad considerable, con una

desviación estándar de 16.64 y una varianza de 276.89. En contraste, los tratamientos con lenteja de agua muestran una variabilidad más baja y constante, con una desviación estándar de 3.72 y una varianza de 13.86 como se detalla en la **tabla 20**. Durante el período de investigación en Paraguay, se observó una reducción en los niveles de clorofila en las plantas, tanto en el grupo de control como en aquellas expuestas a la solución de cromo, con porcentajes de disminución del 48% y 52%, respectivamente, en comparación como el presente estudio se observó que la clorofila de *L. minor* disminuyó hasta un 62,2% y la *E. crassipes* un 88,71% como se detalla en la **gráfica 8**.

Gráfica 5. Comportamiento de la clorofila en los 15 días de estudio del tratamiento

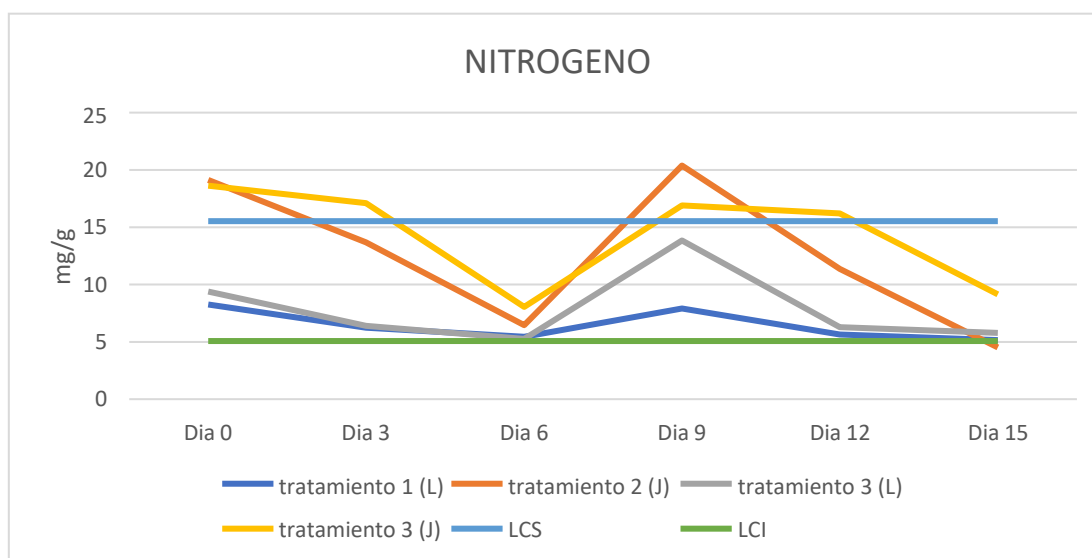


Fuente: (Zambrano, 2023)

Los datos de concentración de nitrógeno revelan diferencias notables entre los tratamientos, en especial los tratamientos que contienen la *E. crassipes* salen del límite de control como se observa en la **gráfica 6**. En cuanto a la variabilidad, de igual manera con los otros análisis muestran una variabilidad considerablemente alta en los tratamientos que contienen la *E. crassipes*, indicada por la desviación estándar y la varianza. Mientras tanto, los tratamientos con *L. minor* exhiben una variabilidad más baja y consistente en la concentración de nitrógeno como detalla la **tabla 21**. En la investigación de la ciudad de Chimborazo el contenido final de nitrógeno en la *L. minor* fue de 0,07 mg/g mientras que *E. crassipes* fue de

0,04 mg/g, sin embargo, en nuestra investigación el contenido fue mucho mas alto, a parte de que la *L. minor* tubo menor contenido de nitrógeno con de entre 5,16 y 5,8 en comparación con *E. crassipes* entre 4,52 y 914 mg/g. Aunque en los dos casos si se redujó el contenido de nitrógeno (Sarango & Sanchez, 2016).

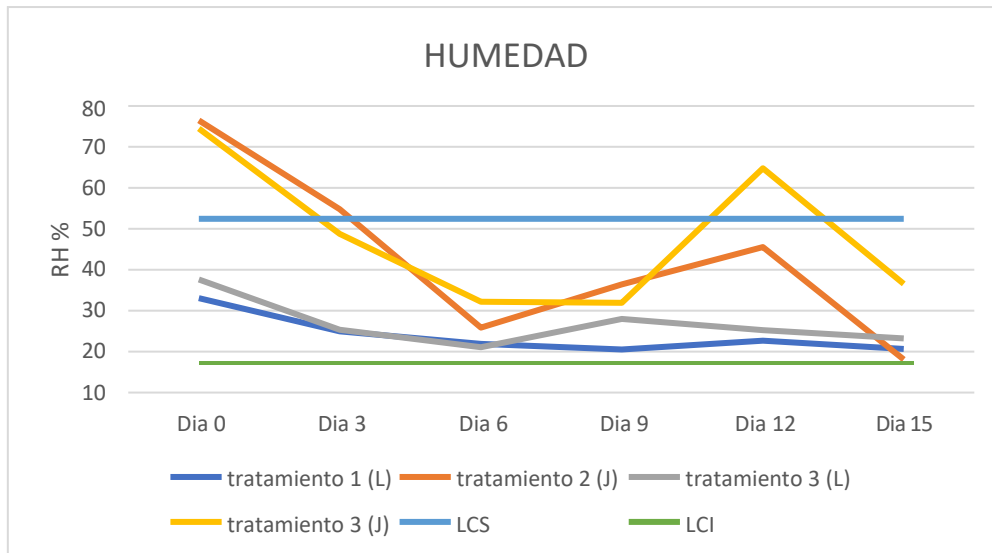
Gráfica 6. Comportamiento del nitrógeno en los 15 días de estudio del tratamiento



Fuente: (Zambrano, 2023)

Los datos de humedad muestran que el *E. crassipes* tiene niveles de humedad más altos en promedio 42.85 en comparación con la *L. minor* con 23.92. Sin embargo, es importante notar que los tratamientos con *E. crassipes* tienen una variabilidad considerablemente alta en los niveles de humedad, indicada por la desviación estándar y la varianza, mientras que los tratamientos con lenteja de agua muestran una variabilidad más baja y constante como se detalla en la **tabla 22**. Estas diferencias en la humedad entre los tratamientos son esenciales para comprender cómo estas plantas acuáticas, *E. crassipes* y *L. minor*, responden a diferentes condiciones de humedad en su entorno acuático, en la **gráfica 7** se ve como de igual manera que en los otros parámetros el tratamiento 2 y 3 con *E. crassipes* salen del límite de control.

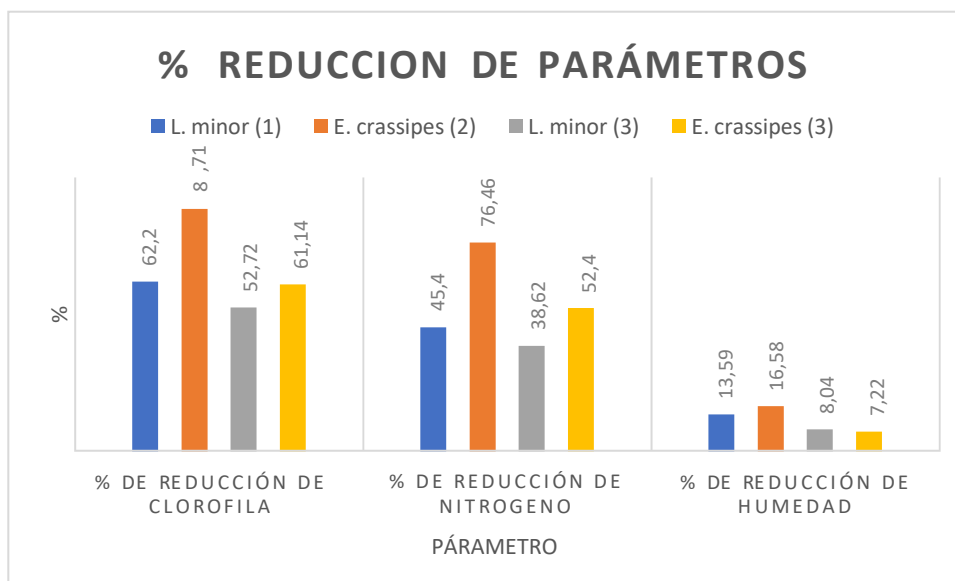
Gráfica 7. Comportamiento de la humedad en los 15 días de estudio del tratamiento



Fuente: (Zambrano, 2023)

En la **gráfica 8** se puede apreciar mejor el comportamiento de estas plantas en los 15 días del experimento demostrando que el parámetro que más disminución tubo fue la clorofila.

Gráfica 8. Porcentaje de reducción de los parámetros de las especies

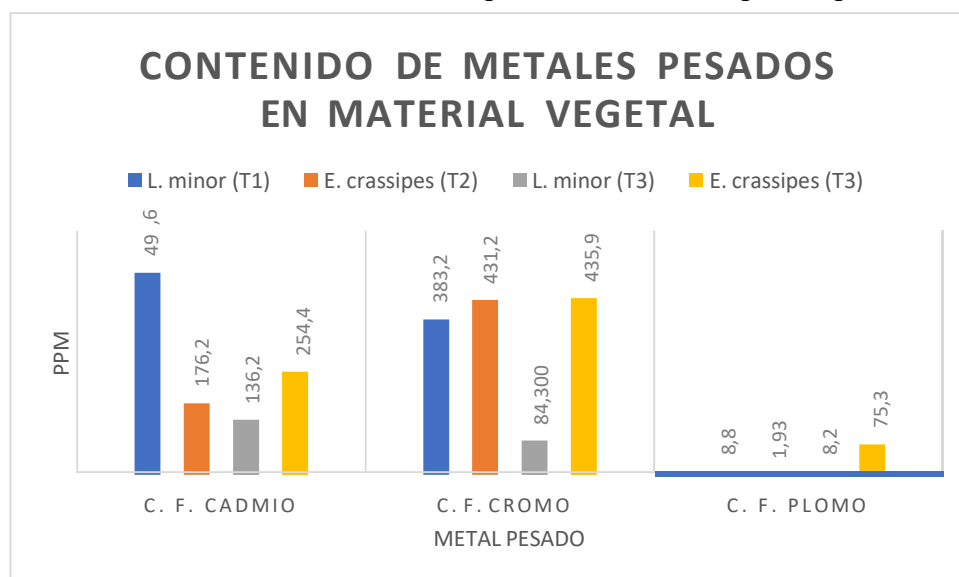


Fuente: (Zambrano, 2023)

4.15 Cuantificación final de metales pesados en las especies *L. minor* y *E. crassipes*

De acuerdo con la **gráfica 9**, se puede observar que en el Tratamiento 1, *L. minor* demostró la mayor capacidad de absorción de cadmio en sus tejidos. Por otro lado, en los Tratamientos 2 y 3, *E. crassipes* destacó como la planta principal en la retención del cadmio. Respecto al plomo, *E. crassipes* fue la que más retuvo el tratamiento 3, aunque en cantidades relativamente bajas. Estos resultados están en parte en concordancia con el porcentaje de remoción de metales pesados en el agua, lo que sugiere que las plantas que mostraron una mayor capacidad de captura de metales pesados contribuyeron significativamente a la eliminación de estos contaminantes en el agua. Ambas especies de plantas acuáticas ampliamente estudiadas han sido objeto de numerosas investigaciones que han corroborado su impresionante capacidad para resistir concentraciones elevadas de metales pesados. Esta resistencia excepcional las clasifica sin lugar a duda como hiperacumuladoras en el contexto de la fitorremediación y la gestión de la contaminación ambiental (Aquino, 2022).

Gráfica 9. Contenido de metales pesados absorbidos por las plantas



Fuente: (Zambrano, 2023)

Se implementó un factor de dilución para la muestra vegetal, que consistió en agregar 50 ml de solvente por cada 0.5 gramos de muestra vegetal. Esto significa que se dividió 50 ml entre 0.5, resultando en un factor de dilución de 100. Luego, este valor se multiplicó por la concentración en ppm obtenida a través del ICP-OES para calcular la concentración real de la muestra vegetal.

Capítulo 5

Conclusiones

El uso de *Lemna minor* (*L. minor*) y *Eichhornia crassipes* (*E. crassipes*), ya sea de manera individual o en combinación, dentro de un biofiltro casero es una estrategia innovadora para la remoción de metales pesados en el agua del Ramal B del Estero Salado.

Ambas plantas demostraron una excepcional capacidad para eliminar metales pesados del agua, con tasas de remoción que superaron el 98% en la mayoría de los casos. Esta alta eficacia se observó en la remoción de cadmio (Cd), cromo (Cr) y plomo (Pb), tres metales pesados comúnmente presentes en cuerpos de agua contaminados.

La combinación de *L. minor* y *E. crassipes* en un mismo biofiltro mostró una sinergia interesante en la remoción de metales pesados. Esta estrategia resultó en tasas de remoción aún más altas que cuando se utilizaban las plantas de manera individual, especialmente en el caso del cromo y el plomo. Los tratamientos con las plantas tuvieron efectos medibles en los parámetros del agua, incluyendo la disminución del pH y el aumento de la conductividad y la concentración de oxígeno disuelto (OD). Estos cambios pueden ser indicativos de la interacción entre las plantas y los iones de metales pesados en el agua.

La comparación de nuestros resultados con investigaciones similares reveló que nuestros tratamientos superaron las tasas de remoción informadas en otros estudios, lo que denota la eficacia de la fitorremediación con *L. minor* y *E. crassipes* en el contexto del Ramal B del Estero Salado.

Los resultados respaldan la viabilidad de utilizar biofiltros caseros con *L. minor* y *E. crassipes* como una solución de bajo costo y eficaz para abordar la contaminación de metales pesados en cuerpos de agua locales. Esta estrategia podría ser particularmente relevante para comunidades que enfrentan problemas de calidad del agua y buscan soluciones asequibles y sostenibles.

Recomendaciones

- Una vez terminado el experimento se puede utilizar la biomasa vegetal para darle otro uso biotecnológico, como es la producción de biocombustible o papel.
- Dado que la eficacia de los tratamientos puede variar con el tiempo y las condiciones ambientales, se recomienda realizar un seguimiento continuo de la calidad del agua y las plantas en el biofiltro. Esto permitirá evaluar la efectividad a largo plazo y realizar ajustes si es necesario.
- Para mejorar la eficacia de la fitorremediación, se pueden explorar ajustes en el diseño del biofiltro, como la cantidad de plantas, la duración de los tratamientos y la recirculación del agua. La optimización del sistema puede ayudar a lograr una mayor remoción de metales pesados y una mejora en los parámetros del agua.
- Es importante asegurarse de que las plantas utilizadas en el biofiltro estén saludables y prosperando. Esto puede requerir el control de nutrientes esenciales, la salud de las raíces y la prevención de plagas y enfermedades. Las plantas saludables son más efectivas en la fitorremediación.
- Los resultados sugieren que la combinación de diferentes tipos de plantas (*L. minor* y *E. crassipes*) puede tener efectos sinérgicos en la remoción de metales pesados. Se debe investigar más esta sinergia y considerar su aplicación en futuros diseños de biofiltros.
- A medida que se implementan sistemas de fitorremediación a mayor escala, es esencial llevar a cabo una evaluación de impacto ambiental para comprender completamente los efectos de la fitorremediación en el ecosistema circundante. Esto ayudará a garantizar la seguridad ambiental a largo plazo.
- Si estos sistemas se implementan en comunidades locales, es fundamental involucrar a la comunidad en el proceso, educar sobre los beneficios y los posibles riesgos, y fomentar la participación en el monitoreo y mantenimiento de los biofiltros.

Referencias bibliográficas

- Acosta Reinoso, D. C., & Alfonso Franco, D. M. (2021). EVALUAR LA CONCENTRACIÓN DE PLOMO EN SEDIMENTO EN EL SECTOR NORTE DEL ESTERO SALADO DE GUAYAQUIL, ENTRE ENERO-FEBRERO DEL 2021.
- Aguilar, M. I. (2002). *Tratamiento físico-químico de aguas residuales: coagulación-floculación*. Editum.
- Aguirre, S. E., Piraneque, N. V., & Linero-Cueto, J. (2021). Concentración de metales pesados y calidad físico-química del agua de la Ciénaga Grande de Santa Marta. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 24(1).
- Alegbeleye, O. O., & Sant'Ana, A. S. (2020). Manure-borne pathogens as an important source of water contamination: An update on the dynamics of pathogen survival/transport as well as practical risk mitigation strategies. *International journal of hygiene and environmental health*, 227, 113524.
- Ali, S., Abbas, Z., Rizwan, M., Zaheer, I., Yavaş, İ., Ünay, A., Abdel-DAIM, M., Bin-Jumah, M., Hasanuzzaman, M., & Kalderis, D. (2020). Application of floating aquatic plants in phytoremediation of heavy metals polluted water: A review. *Sustainability*, 12(5), 1927.
- Andrade Calvachi, V. A., & Rosero Carvajal, J. A. (2018). Evaluación de la remoción de materia orgánica en humedales artificiales de flujo subsuperficial a escala piloto como tratamiento de pulimento en las aguas residuales de frígovito SA.
- Ansari, A. A., Naeem, M., Gill, S. S., & AlZuaibr, F. M. (2020). Phytoremediation of contaminated waters: An eco-friendly technology based on aquatic macrophytes application. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 46(4), 371-376.
- Aquino Carmen, M. P. (2022). Evaluación de la capacidad de remoción de nitrógeno y fósforo por *Lemna minor* L. en aguas residuales provenientes de la actividad acuícola del Centro de Investigación Biológica CIB-Ancón.
- Aquino Chilón, J. D. (2023). Eficiencia de macrófitas flotantes en la depuración de aguas contaminadas por plomo y cadmio, cajamarca–2021.
- Arcos Guzmán, J. E. (2021). Propuesta de reducción del tiempo de cambio de molde de troquel mediante la metodología SMED en la línea de FWS.
- Arroyo, A. V. Á., Cayeiro, M. L. P., & Bedoya, A. M. M. (2015). Criterios de zonificación ambiental: estudio de caso estero salado de Guayaquil-Ecuador. *Revista científica ecociencia*, 2(5).
- Arteaga-Cortez, V. M., Quevedo-Nolasco, A., Valle-Paniagua, D. H. D., Castro-Popoca, M., Bravo-

- Vinaja, Á., & Ramírez-Zierold, J. A. (2019). Estado del arte: una revisión actual a los mecanismos que realizan los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno y fósforo. *Tecnología y ciencias del agua*, 10(5), 319-343.
- Ayanda, O. I., Ajayi, T., & Asuwaju, F. P. (2020). Eichhornia crassipes (Mart.) Solms: Uses, challenges, threats, and prospects. *The Scientific World Journal*, 2020.
- Barroso, Y. M. M., Mantilla, P. A. P., & Perez, J. F. B. (2019). Remoción de cromo en aguas residuales industriales mediante el uso de biomasa de Spirulina sp, sedimentación primaria y precipitación química. *Revista de investigación agraria y ambiental*, 10(1), 141-152.
- Barton, C., Marx, D., Adriano, D., Jun-Koo, B., Newman, L., Czapka, S., Blake, J. 2005. Phytostabilization of a landfill containing coal combustion waste. *Environmental Geosciences*. 12: 251-265.
- Biata, N. R., Dimpe, K. M., Ramontja, J., Mketi, N., & Nomngongo, P. N. (2018). Determination of thallium in water samples using inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) after ultrasonic assisted-dispersive solid phase microextraction. *Microchemical Journal*, 137, 214-222.
- Bladé Castellet, E. (2005). *Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Caja-Molina, A. V., & Iannacone, J. (2021). Evaluación del riesgo ambiental por petróleo crudo en las especies acuáticas Lemna minor, Daphnia magna y Danio rerio. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 45(176), 777-794.
- CEM (2019) MARS 6 – Method note compendium
- Chenet, J. G., Solorza Medina, J. D., & Ramírez Contreras, D. L. (2018). Tratamiento de aguas grises con humedales artificiales en la Universidad EAN (resultados parciales). *Editorial Universidad Manuela Beltrán*, 77.
- Chicaiza Ortiz, C. D., Rivadeneira Arias, V. D. C., & Herrera-Feijoo, R. J. (2023). *Biotechnología Ambiental, Aplicaciones y Tendencias*.
- Chingay, V., & Eduardo, J. (2018). Remoción de materia orgánica de las aguas residuales de la universidad cesar vallejo-trujillo utilizando jacinto de agua (eichhornia crassipes) en humedales artificiales.

- Corbin, A. (2018). Reflexiones sobre el agua dulce, el agua salada, y su historia. *Cuadernos LIRICO. Revista de la red interuniversitaria de estudios sobre las literaturas rioplatenses contemporáneas en Francia*, (18).
- Coronel Acosta, E. G. (2018). *Determinación de metales pesados plomo (Pb) y cadmio (Cd) en hortalizas de consumo directo producidas orgánicamente* (Bachelor's thesis, Quito: UCE).
- Crespi, R., Soler, C., Soler, E., & Pugliese, M. (2018). Evaluación de humedales artificiales de flujo libre superficial con macrófitas acuáticas flotantes. *Ingeniería del agua*, 22(2), 69-78.
- Cruz López, C. A. D. L., Ramos Arcos, S. A., & López Martínez, S. (2018). Efecto de la adición de ácidos orgánicos sobre la bioacumulación de Plomo, Talio y Vanadio en *Chrysopogon zizanioides* creciendo sobre suelos contaminados de un relleno sanitario. *Nova scientia*, 10(21), 403-422.
- Dávila Moscoso, M. P., & López Piña, E. G. (2020). *Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales construidos de flujo subsuperficial vertical utilizando diferentes plantas emergentes* (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay).
- Delgadillo-López, A. E., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R., & Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14(2), 597-612.
- Endara, A. D. L. M. G., Heinert, M. E. J., & Solórzano, H. X. P. (2020). Contaminación del agua y aire por agentes químicos. *RECIMUNDO*, 4(4), 79-93.
- Falero Alvarado, Y. (2021). 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.
- Flores, C. M., Del-Angel, E., Frías, D. M., & Gómez, A. L. (2018). Evaluación de parámetros fisicoquímicos y metales pesados en agua y sedimento superficial de la Laguna de las Ilusiones, Tabasco, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(2), 39-57.
- Flores Flores, F. (2019). Efectividad del Tratamiento Secundario de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales para el Vertimiento del Efluente en el Distrito de Palca.
- Franco, A. R., Naranjo, J. M. P., Nieto, D. M. C., & Sierra, M. S. B. (2016). Implementación de un sistema de fitorremediación en zona aledaña a reserva forestal protectora El Malmo, Boyacá, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 7(1), 93-103.

- Gallego Piñol, E., Roca Mussons, F. J., & Perales Lorente, J. F. (2013). Calidad de aire interior: Filtros de carbón activo para su mejora.
- García, A. et al. (2020). Ecological Dynamics of the Guayaquil Estuary in Ecuador: Insights from Recent Research. *Journal of Coastal Research*, 36(5), 1102-1115.
- Grueso-Dominguez, M. C., Castro-Jiménez, C. C., Correa-Ochoa, M. A., & Saldarriaga-Molina, J. C. (2019). Estado del arte: desalinización mediante tecnologías de membrana como alternativa frente al problema de escasez de agua dulce. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 18(35), 69–89.
- Guarco, K. (2015). *TRATAMIENTO DEL SEDIMENTO MARINO DEL RAMAL B (Tesis de grado, ESPOL)*. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.
- Guerra Sandoval, B. G. (2018). *Tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria de productos lácteos San Salvador–cantón Riobamba, mediante Fitorremediación con humedales artificiales empleando totora* (Bachelor's thesis, Universidad Nacional de Chimborazo, 2018).
- Guerrero, M. (2023). *El agua*. Fondo de cultura económica.
- Gutierrez Miranda, D. D., & Zapata Morante, A. A. (2023). Análisis de la capacidad de fitorremediación de las especies macrófitas: Eichhornia crassipes, Lemna minor, Typha latifolia, Phragmites australis y Scirpus californicus en el tratamiento de efluentes con metales pesados, 2022.
- Hellen, J. (2022). Fitorremediación con macrofitas en la remoción de metales pesados en aguas residuales, a nivel de laboratorio, 2021.
- Hernández-Caricio, C., Ramírez, V., Martínez, J., Quintero-Hernández, V., Baez, A., Munive, J.-A., & Nora, R.-M. (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: el caso de Bacillus como bioherramienta para la recuperación de suelos*.
- Hernández, M. E. L., & Hernández, O. E. M. (2022). Fitorremediación de suelos contaminados por metales pesados: una revisión. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo*, 12(2), 15-28.
- Iravanian, A., & Ravari, S. O. (2020, December). Types of contamination in landfills and effects on the environment: a review study. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 614, No. 1, p. 012083). IOP Publishing.

IUPAC (2022). *IUPAC periodic table of the elements*. Iupac.org. Retrieved

Jaramillo Jumbo, M. D. C., & Flores Campoverde, E. D. (2012). *Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales Lemna minor (Lenteja de agua), y Eichhornia crassipes (Jacinto de agua) en aguas residuales producto de la actividad minera* (Bachelor's thesis).

Jiménez Heinert, M., Grijalva Endara, A., & Ponce Solórzano, H. (2020). Plasma acoplado inductivamente en espectroscopia de emisión óptica (ICP-OES). *RECIMUNDO*, 4(4), 4-12.

Lahmeyer-Cimentaciones. (2000). Estudio de Prefectabilidad, Factibilidad y Selección de la Mejor Alternativa del Plan Integral de la Recuperación del Estero Salado. Guayaquil: Municipalidad de Guayaquil

Lara, J. W. R., Cervantes, F., Arámbula-Villa, G., Amaro, L. A. M., Mancilla, C. L. A., & Enríquez, E. A. (2022). Lirio acuático (*Eichhornia crassipes*): una revisión. *Agronomía Mesoamericana*, 33(1), 23.

Linnaeus, C.V (1753). *Species plantarum Exhibentes V2*, 970. Revista Tropicos.org.

LLacza Quispe, Z. M. (2018). Uso de rizofiltración mediante la *Myriophyllum aquaticum* y el método de osmosis inversa en el efluente minero de la zona de Uchumayo Arequipa, 2018.

Lopez Diaz, J. S., & Barrera Alvan, J. D. (2021). Fitodepuración con cuatro especies de macrófitas flotantes mediante el sistema de aireación a escala piloto de la laguna “mansión” de la Universidad Peruana Unión.

Lorenzo-Acosta, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 40(2), 10-17.

Lucio, M. M. V., Cutiupala, G. M. A., Pacheco, E. D. G., & Vásquez, D. F. L. (2023). Revisión bibliográfica: uso de especies vegetales como biopurificadoras del recurso hídrico. *Polo del Conocimiento*, 8(5), 352-372.

Madueño, F., & García, M. (2018). Determinación de metales pesados (Plomo y Cadmio) en lechuga (*Lactuca sativa*) de mercados de Lima metropolitana. *Cienc. Investig*, 21, 19-23.

Malaver, A. (2013). *Evaluación de un Humedal artificial de flujo superficial empleando* (Tesis de grado). Universidad Libre Sede Bosque Popular.

Maldonado-Jimenez, I., & Aparicio-Saavedra, M. E. (2021). Estimación del almacenamiento de carbono

- en la biomasa de macrófitas en la Bahía interior de Puno, lago Titicaca. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 8(2).
- Mariscal-Santi, W. E., Garcia-Larreta, F. S., Mariscal-Garcia, R. S., Cornejo-Ortega, A. V., Ortega-Ramirez, P. M., Montiel-Rivera, T. A., ... & Eduardo, F. (2018). Evaluación de la contaminación físico-química de las aguas del estero salado, sector norte de la ciudad de Guayaquil-Ecuador-2017. *Polo del Conocimiento*, 3(4), 133-149.
- Masco Miró, P. R., & Ugarte Huamani, J. A. (2022). Implementación de humedales de flujo superficial para el tratamiento secundario por biorremediación con *Eichhornia crassipes* y Microorganismos eficaces (EM) de aguas residuales de Curtiembre, Arequipa 2021.
- Mayia Rojas, Y. N. (2021). *Determinación de cadmio y plomo en agua y sedimento en el estero Data de Posorja, provincia del Guayas-Ecuador* (Bachelor's thesis, Facultad de Ciencias Naturales. Universidad deGuayaquil).
- Meermann, B., & Nischwitz, V. (2018). ICP-MS for the analysis at the nanoscale—a tutorial review. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 33(9), 1432-1468.
- Mendarte-Alquisira, C., Alarcón, A., & Ferrera-Cerrato, R. (2021). Fitorremediación: Alternativa biotecnológica para recuperar suelos contaminados con DDT. Una revisión. *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 24.
- Méndez, N. L., Parrado, C., & Henríquez, L. (2020). *Procesos de fitorremediación en suelos contaminados con cadmio: Revisión de Literatura* (Doctoral dissertation, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano).
- Mendieta Morrillo, E. E., & Zambrano Valdéz, B. J. (2019). *Efecto de un biodegradador enzimático comercial en la producción de biol a partir de jacinto de agua (eichhornia crassipes solms)* (Bachelor's thesis, Calceta: ESPAM MFL).
- Mendoza Roca, N. M., & Pilaguano Morán, M. J. (2021). *Evaluación del contenido de arsénico, plomo y cadmio en agua y algas del ramal del Estero Salado, sector las Orquídeas-Guayaquil* (Doctoral dissertation, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Químicas).
- Mercado Chinchay, S., & Morales Palacios, G. L. (2021). Revisión bibliográfica del uso de plantas fitorremediadoras en la recuperación de suelos contaminados con metales pesados.
- Mestanza Gaibor, M. D. C., & Varas Marshall, A. S. (2021). *Calidad del agua del Estero Salado La Chala; y, su incidencia en la preservación de la vida acuática* (Doctoral dissertation,

Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Químicas).

Ministerio del ambiente del Ecuador (2015). *REFORMA TEXTO UNIFICADO LEGISLACION SECUNDARIA, MEDIO AMBIENTE, LIBRO VI, Decreto*. Gob.Ec.

Monroy, A. F., Martínez, J. J., & Caicedo, G. A. (2022). Estrategias de aprovechamiento del jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) hacia la producción de bioetanol. *Ciencia en Desarrollo*, 13(2), 185-200.

Montano, Y., Tapia, P. M., Fow, A., & Fuentealba, B. (2022). Fitorremediación. Una alternativa para tratar la contaminación ambiental.

Muñoz, L., & Yair, E. (2019). Eficiencia de cuatro biomásas de *Eichhornia Crassipes* en la remoción de cadmio en aguas residuales del tragadero Yacuchingana–Cajamarca.

Navarrete, G., Morales, L., Domínguez, L., & Marín, J. P. (2019). Contaminación por metales pesados en el golfo de Guayaquil: incluso datos limitados reflejan impactos ambientales de las actividades antrópicas. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 52-55.

Navarro, W. M. (2019). Adsorción de Metales Pesados de Aguas Residuales de la Mina Lunar de Oro con Carbón Activado de Lenteja de Agua (*Lemna gibba* L.). *Ñawparisun-Revista de Investigación Científica*, 1(2).

Neaman, A., Verdejo, J., Ramírez, M., & Pinochet, D. (2021). Fitoextracción de metales desde suelos contaminados: ¿Oportunidad o utopía?. *Agro sur*, 49(1), 1-4.

Núñez, A. P., Angeles, F. T., Pichihua, P. M., & Acosta, G. Y. (2018). Remoción de cromo de efluentes de la industria curtiembre mediante electrodiálisis. *Industrial data*, 21(1), 27-34.

Oliveros, M. I. M. (2022). Aislamiento, caracterización e identificación de bacterias tolerantes a metales pesados asociadas a raíces de plantas que habitan en los jales mineros de Huautla, Morelos.

ONU (2021). *Agua | Naciones Unidas*.

Ossai, I. C., Ahmed, A., Hassan, A., & Hamid, F. S. (2020). Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 17, 100526.

Pabón, S. E., Benítez, R., Sarria, R. A., & Gallo, J. A. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14(27), 9-18.

- Pacheco Peña, L. A. (2021). Capacidad de Adsorción de plomo (II) mediante el uso de totora (*Scirpus californicus*), en las aguas contaminadas.
- Paredes, J., & Ñique, M. (2018). Optimización de la fitorremediación de mercurio en humedales de flujo continuo empleando *Eichhornia crassipes* “Jacinto de agua”. *RevIA*, 5(1 y 2).
- Peixoto Peña, E. F. (2018). Rizofiltración de Alfalfa (*Medicago sativa* L.) y Coliflor (*Brassica oleracea* var. *Botrytis*), para Tratamiento de suelos contaminados con cadmio y plomo, en San José de Parác (Huarochiri–Lima) 2018-1.
- Peña Guzmán, C. A., & Lara Borrero, J. (2012). Tratamiento de aguas de escorrentía mediante humedales artificiales: Estado del arte. *Ciencia e ingeniería Neogranadina*, 22(2), 39-61.
- 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.
- Plate Leon, K. S. (2019). Estudio de prefactibilidad para la propuesta de instalación de una planta productora de harina de lenteja de agua (*Lemna minor*) para la sustitución de torta de soya en la alimentación avícola en la región Lambayeque.
- Quintero, V. (2021). Baterías de Ion Litio: características y aplicaciones. *I+ D Tecnológico*, 17(1), 14-22.
- Quispe Yana, R. F., Belizario Quispe, G., Chui Betancur, H. N., Huaquisto Cáceres, S., Calatayud Mendoza, A. P., & Yábar Miranda, P. S. (2019). Concentración de metales pesados: cromo, cadmio y plomo en los sedimentos superficiales en el río Coata, Perú. *Revista Boliviana de Química*, 36(2), 83-90.
- Rodríguez-Villacis, J. E., Hernández-Gavilánez, A., Silva-Huilcapi, C., Alvarado-Alvarado, H. M., Mariscal-García, R. S., García-Larreta, F. S., & Mariscal-Santi, W. E. (2018). Evaluación de la contaminación físico-química y microbiológica de aguas del estero salado. *Domino De Las Ciencias*, 3(4), 672–691.
- Rojas, S. et al. (2021). Addressing Conservation and Development Challenges in the Guayaquil Estuary: Insights from Interdisciplinary Research. *Estuaries and Coasts*, 44(4), 987-1001.
- Requejo Mirez, W. (2020). Revisión sistemática: Tipos de humedales artificiales y su capacidad de remoción de materia orgánica en aguas residuales domésticas.
- Rodríguez-Gonzales, A., Zárate-Villarroe, S. G., & Bastida-Codina, A. (2022). Biodiversidad bacteriana presente en suelos contaminados con hidrocarburos para realizar biorremediación. *Revista de*

Ciencias Ambientales, 56(1), 178-208.

- Salas-Ávila, D., Chaiña-Chura, F. F., Belizario-Quispe, G., Quispe-Mamani, E., Huanqui-Pérez, R., Velarde-Coaquira, E., ... & Hermoza-Gutiérrez, M. (2021). Evaluación de metales pesados y comportamiento social asociados con la calidad del agua en el río Suches, Puno, Perú. *Tecnología y ciencias del agua*, 12(6), 145-195.
- Sánchez, L. et al. (2019). Sustainable Management Strategies for the Guayaquil Estuary: Lessons from Recent Studies. *Marine Ecology Progress Series*, 42(2), 221-235.
- Sandoval Polo, B. J. (2022). Eficiencia de la vetiveria (*Chrysopogon zizanioides*) en la rizofiltración de suelos agrícolas contaminados con metales, en el caserío de Plazapampa–distrito Salpo–provincia Otuzco–La Libertad, 2021.
- Sandoval Vilchez, J. D. (2019). Eficiencia del jacinto de agua *eichhornia crassipes* y lenteja de agua *lemna minor* L. en la remoción de cadmio en aguas residuales.
- Sankhla, M. S., Kumari, M., Sharma, K., Kushwah, R. S., & Kumar, R. (2018). Water contamination through pesticide & their toxic effect on human health. *International journal for research in applied science and engineering technology*, 6(1), 967-970.
- Santoyo, G. (2018). El cromo (VI) induce la frecuencia de mutación y pérdida de heterocigocidad en *Saccharomyces cerevisiae*. *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 21(1), 34-39.
- Sarango Araujo, O. P., & Sánchez Ramírez, J. A. (2016). *Diseño y construcción de 2 biofiltros con Eichhornia Crassipes y Lemna Minor para la evaluación de la degradación de contaminantes en aguas residuales de la extractora Río Manso EXA SA "Planta la Comuna", Quinindé* (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).
- Sarria-Villa, R. A., Gallo-Corredor, J. A., & Benítez-Benítez, R. (2020). Tecnologías para remover metales pesados presentes en aguas. Caso Cromo y Mercurio. *Journal de Ciencia e Ingeniería*, 12(1).
- Schmidt, M. A. (2021). Regulaciones, políticas públicas y emergencia de conflictos por el uso de agrotóxicos en la provincia de Salta, Argentina. In *XII Congreso Argentino de Antropología Social (CAAS)(La Plata, junio, julio y septiembre de 2021)*.
- Schweitzer, L., & Noblet, J. (2018). Water contamination and pollution. In *Green chemistry* (pp. 261-290). Elsevier.

- Segalá, Y. C. (2019). Fitorremediación de aguas residuales con lenteja de agua. *ICU. Investigación, Ciencia y Universidad*, 3(4), 52-52.
- Singh, B. R., & Steinnes, E. (2020). Soil and water contamination by heavy metals. In *Soil processes and water quality* (pp. 233-271). CRC Press.
- Thalasso, F., & Pineda, R. (2002). Biofiltración: tratamiento biológico de aire contaminado. *Avance y perspectiva*, 21, 325-327.
- Tejada-Tovar, C., Paz-Astudillo, I., Villabona-Ortíz, A., Espinosa-Fortich, M., & López-Badel, C. (2018). Aprovechamiento del Jacinto de Agua (*Eichhornia crassipes*) para la síntesis de carboximetilcelulosa. *Revista Cubana de Química*, 30(2), 211-221.
- Torres Torres, A. G. (2020). Tratamiento de aguas residual doméstica mediante sistemas de depuración con macrófitas (*Lemna minor* y *Eleocharis palustris*) en la universidad nacional de ucayali octubre 2018-setiembre 2019.
- Trujillo, A. F. O., & Cajigas, M. E. M. (2018). Validación de un método para el análisis de color real en agua. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 7(1), 143-155.
- Untiveros León, T. E., & Salvatierra De La Cruz, J. A. (2022). Influencia del agua termal sobre las propiedades físicas del concreto, Huancavelica.
- Uriña, A. (2022). *Análisis de Metales Pesados, Cadmio y Plomo, en el suelo de Cultivo de Banano (Musa Paradisiaca), en la Hacienda "Chaparral", Cantón Balzar* (Doctoral dissertation, Tesis de grado, Universidad Agraria del Ecuador]. [https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/URIÑA COELLO VICTOR ARIEL. pdf](https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/URIÑA_COELLO_VICTOR_ARIEL.pdf)).
- Valer, I. S., Rimarachín, V., Gonzales, C. P., Maestre, J. A., Torres, H. O., Roldán, V. C., Hidalgo, M., Águila, D., Comunicaciones, Z., Jerry, C., Maestre, A., Neón, S. A. C., Ministerio, & Ambiente, D. (2014). *Métodos de colecta, identificación y análisis de comunidades biológicas*: Gob.pe.
- Vergara Tineo, R. M. (2021). Diseño de biofiltros para mejorar el manejo de aguas residuales domésticas.
- Vicenta, M. A., Jesús, Á. R., Esther, A. N., & María, P. C. (2019). *Gestión y conservación de aguas y suelos*. Editorial UNED.
- Vilela, C. L. S., Bassin, J. P., & Peixoto, R. S. (2018). Water contamination by endocrine disruptors: Impacts, microbiological aspects and trends for environmental protection. *Environmental pollution*, 235, 546-559.

Villalobos, M. & López, J. (2018). Biodiversity and Economic Valuation of the Guayaquil Estuary: Implications for Sustainable Management. *Environmental Science and Conservation*, 25(3), 419-432.

Yamini, Y., & Safari, M. (2018). Modified magnetic nanoparticles with catechol as a selective sorbent for magnetic solid phase extraction of ultra-trace amounts of heavy metals in water and fruit samples followed by flow injection ICP-OES. *Microchemical Journal*, 143, 503-511.

Zarza, L. F. (2021). *¿Cuál es la densidad del agua? ¡Agua!*

Anexos

Anexos de tablas

Tabla 15. Criterio de calidad admisible para la preservación de la flora y fauna en aguas dulces, frías o cálidas, y en aguas marinas o estuarios.

Parámetros	Expresados como	Unidad	Criterio de calidad		
			Agua fría dulce	Agua cálida dulce	Agua marina y estuario
Aluminio	Al	mg/l	0,1	0,1	1,5
Amoniaco	NH ₃	mg/l	0,02	0,02	0,4
Arsénico	As	mg/l	0,05	0,05	0,05
Bario	Ba	mg/l	1,0	1,0	1,0
Berilio	Be	mg/l	0,1	0,1	1,5
Difeniles policlorinados (PCBs)	Concentración total de los PBCs	µg/l	1,0	1,0	1,0
Boro	B	mg/l	0,75	0,75	5,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,001	0,001	0,005
Cianuros	CN	mg/l	0,01	0,01	0,01
Cinc	Zn	mg/l	0,18	0,18	0,17
Cloro	Cl ₂	mg/l	0,01	0,01	0,01
Clorofenoles		mg/l	0,5	0,5	0,5
Cobalto	Co	mg/l	0,2	0,2	0,2
Cobre	Cu	mg/l	0,02	0,02	0,05
Coliformes Fecales	NMP	NMP/10 0 ml	200	200	200
Cromo Total	Cr	mg/l	0,05	0,05	0,05
Estaño	Sn	mg/l			2,00
Fenoles monohídricos	Expresado como fenoles	mg/l	0,001	0,001	0,001

Grasas y aceites	Sustancias solubles en hexano	mg/l	0,3	0,3	0,3
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	0,5	0,5	0,5
Hierro	Fe	mg/l	0,3	0,3	0,3
Manganeso	Mn	mg/l	0,1	0,1	0,1
Materia flotante	Visible	mg/l	Ausencia	Ausencia	Ausencia
Mercurio	Hg	mg/l	0,0002	0,0002	0,0001
Niquel	Ni	mg/l	0,025	0,025	0,1
Oxígeno disuelto	OD	mg/l	No menor al 80% y no menor a 6 mg/l	No menor al 60% y no menor a 5 mg/l	No menor al 60% y no menor a 5 mg/l
Piretroides	Concentración de piretroides totales	mg/l	0,05	0,05	0,05
Plaguicidas organoclorados totales	Organoclorados totales	µg/l	10,0	10,0	10,0
Plaguicidas organofosforados totales	Organofosforados totales	µg/l	10,0	10,0	10,0
Plata	Ag	mg/l	0,01	0,01	0,005
Plomo	Pb	mg/l			0,01
Potencias de hidrogeno	pH		6, 5-9	6, 5-9	6, 5-9, 5
Selenio	Se	mg/l	0,01	0,01	0,01
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	mg/l	0,0002	0,0002	0,0002

Temperatura	°C		Condicione s naturales +5	Condicione s naturales +5	Condicione s naturales +5
Tensoactivos	Sustancias activas metileno	mg/l	0,5	0,5	0,5

Fuente: Ministerio del Ambiente de Ecuador (2015).

Tabla 16. Descripción estadística de la concentración inicial de metales pesados

Cuantificación inicial de metales pesados en el Estero Salado					
Cadmio ppm		Cromo ppm		Plomo ppm	
Media	0,2345	Media	1,14025	Media	0,349
Mediana	0,2335	Mediana	1,121	Mediana	0,284
Moda	#N/D	Moda	#N/D	Moda	#N/D
Desviación estándar	0,0262106 85	Desviación estándar	0,045529 29	Desviación estándar	0,178007 49
Varianza de la muestra	0,000687	Varianza de la muestra	0,002072 92	Varianza de la muestra	0,031686 67

Fuente: (Zambrano, 2023)

Tabla 17. Descripción estadística del pH

pH							
<i>Tratamiento</i> 1	<i>Traramiento</i> 2		<i>Tratamiento</i> 3		<i>Control</i>		
Media	7,0916 66667	Media	7,2766 66667	Media	7,3316 6667	Media	7,45
Mediana	7,09	Mediana	7,26	Mediana	7,375	Mediana	7,47
Moda	7,09	Moda	#N/D	Moda	#N/D	Moda	7,45
Desviación estándar	0,0263 94444	Desviación estándar	0,0694 74216	Desviación estándar	0,1650 9593	Desviación estándar	0,1214 9074
Varianza de la muestra	0,0006 96667	Varianza de la muestra	0,0048 26667	Varianza de la muestra	0,0272 5667	Varianza de la muestra	0,0147 6

Fuente: (Zambrano, 2023)

Tabla 18. Descripción estadística de la Conductividad Eléctrica

CONDUCTIVIDAD							
Tratamiento 1	Tratamiento 2		Tratamiento 3		Control		
	1459,3		1380,1		1388,3		1193,6
Media	33333	Media	66667	Media	3333	Media	6667
Mediana	1517,5	Mediana	1426	Mediana	1441,5	Mediana	1247,5
Moda	#N/D	Moda	#N/D	Moda	#N/D	Moda	#N/D
Desviación estándar	189,87 11844	Desviación estándar	171,74 44807	Desviación estándar	164,18 1201	Desviación estándar	141,91 9226
Varianza de la muestra	36051, 06667	Varianza de la muestra	29496, 16667	Varianza de la muestra	26955, 4667	Varianza de la muestra	20141, 0667

Fuente: (Zambrano, 2023)

Tabla 19. Descripción estadística de los TDS

TDS							
Tratamiento 1	Tratamiento 2		Tratamiento 3		Control		
	548,33		519,83		523,16		452,66
Media	33333	Media	33333	Media	6667	Media	6667
Mediana	551,5	Mediana	524,5	Mediana	526,5	Mediana	454
Moda	#N/D	Moda	#N/D	Moda	#N/D	Moda	#N/D
Desviación estándar	25,413 90695	Desviación estándar	22,990 57778	Desviación estándar	17,359 9155	Desviación estándar	9,1360 0934
Varianza de la muestra	645,86 66667	Varianza de la muestra	528,56 66667	Varianza de la muestra	301,36 6667	Varianza de la muestra	83,466 6667

Fuente: (Zambrano, 2023)

Tabla 20. Descripción estadística de la Clorofila

CLOROFILA							
Tratamiento 1 (L)	Tratamiento 2 (J)		Tratamiento 3 (L)		Tratamiento 3 (J)		
	10,603		25,503		12,74		32,573
Media	33333	Media	33333	Media	33333	Media	33333
Mediana	9,27	Mediana	24,01	Mediana	11,48	Mediana	31,67
Moda	#N/D	Moda	#N/D	Moda	#N/D	Moda	#N/D
Desviación estándar	3,7232 97821	Desviación estándar	16,639 97316	Desviación estándar	4,576 15413	Desviación estándar	15,294 32139
Varianza de la muestra	13,862 94667	Varianza de la muestra	276,88 87067	Varianza de la muestra	20,94 11867	Varianza de la muestra	233,91 62667

Fuente: (Zambrano, 2023)

Tabla 21. Descripción estadística de los Nitrógeno

NITROGÉNO							
Tratamiento 1 (L)	Tratamiento 2 (J)		Tratamiento 3 (L)		Tratamiento 3 (J)		
	6,4433		12,593		7,8333		14,333
Media	33333	Media	33333	Media	33333	Media	33333
Mediana	5,94	Mediana	12,54	Mediana	6,35	Mediana	16,55
Moda	#N/D	Moda	#N/D	Moda	#N/D	Moda	#N/D
Desviación estándar	1,3190 55217	Desviación estándar	6,4610 05082	Desviación estándar	3,2770 88138	Desviación estándar	4,5316 42822
Varianza de la muestra	1,7399 06667	Varianza de la muestra	41,744 58667	Varianza de la muestra	10,739 30667	Varianza de la muestra	20,535 78667

Fuente: (Zambrano, 2023)

Tabla 22. Descripción estadística de la Humedad

HUMEDAD							
Tratamiento 1 (L)		Tratamiento 2 (J)		Tratamiento 3 (L)		Tratamiento 3 (J)	
			42,853				48,116
Media	23,92	Media	33333	Media	26,73	Media	66667
Mediana	22,24	Mediana	40,96	Mediana	25,27	Mediana	42,67
Moda	#N/D	Moda	#N/D	Moda	#N/D	Moda	#N/D
Desviación estándar	4,7466 36704	Desviación estándar	21,096 9369	Desviación estándar	5,811 70887	Desviación estándar	18,023 88822
Varianza de la muestra	22,530 56	Varianza de la muestra	445,08 07467	Varianza de la muestra	33,77 596	Varianza de la muestra	324,86 05467

Fuente: (Zambrano, 2023)

Anexos de figuras

Figura 26. Recolección de muestra de agua en el Estero Salado

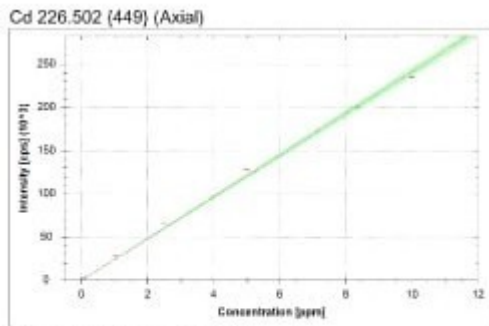


Figura 27. Observación de la *Lemna minor* en el microscopio



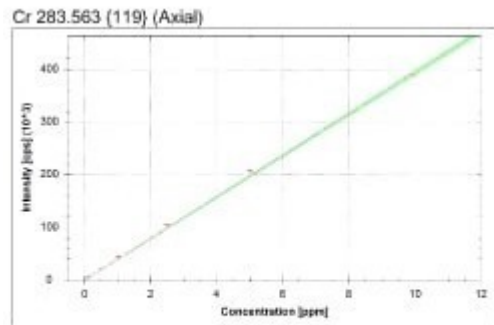
Gráfica 10. Curva de calibración de Cd (A), Cr (B), y Pb (C)

A



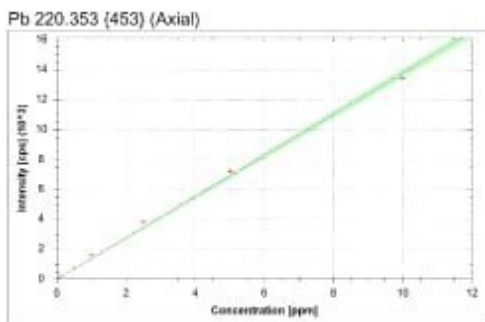
$f(x) = 24099.1078 \cdot x + 16.8178$
 $R^2 = 0.9970$
BEC = 0.001 ppm
LoD = 0.0003 ppm

B



$f(x) = 39362.8130 \cdot x + 51.2694$
 $R^2 = 0.9983$
BEC = 0.001 ppm
LoD = 0.0001 ppm

C



$f(x) = 1376.3793 \cdot x + -3.6657$
 $R^2 = 0.9970$
BEC = -0.003 ppm
LoD = 0.0020 ppm