



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 16 de diciembre de 2019

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Javier Hernando Quesada Duque \_\_\_\_\_, con C.C. No. 1075232375 \_\_\_\_\_,  
\_\_\_\_\_, con C.C. No. \_\_\_\_\_,  
\_\_\_\_\_, con C.C. No. \_\_\_\_\_,  
\_\_\_\_\_, con C.C. No. \_\_\_\_\_,

autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o \_\_\_\_\_

titulado Evaluación de la capacidad biorremediadora de la macrófita Lemna minor en aguas contaminadas con metales pesados \_\_\_\_\_  
presentado y aprobado en el año 2019\_\_\_ como requisito para optar al título de

Magíster en Ingeniería y Gestión Ambiental \_\_\_\_\_;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales "open access" y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional [www.usco.edu.co](http://www.usco.edu.co), link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: Javier A. Quezada

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: \_\_\_\_\_

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: \_\_\_\_\_

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: \_\_\_\_\_



**TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:** Evaluación de la Capacidad Biorremediadora de la Macrófita *Lemna Minor* en Aguas Contaminadas con Metales Pesados

**AUTOR O AUTORES:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Quesada Duque	Javier Hernando

**DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Pastrana Bonilla	Eduardo

**ASESOR (ES):**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:** Magister en Ingeniería y Gestión Ambiental

**FACULTAD:** Ingeniería

**PROGRAMA O POSGRADO:** Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental

**CIUDAD:** Neiva

**AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2019

**NÚMERO DE PÁGINAS:** 115

**TIPO DE ILUSTRACIONES** (Marcar con una X):

Diagramas\_X\_ Fotografías\_X\_ Grabaciones en discos\_\_\_ Ilustraciones en general\_X\_  
Grabados\_\_\_ Láminas\_\_\_ Litografías\_\_\_ Mapas\_\_\_ Música impresa\_\_\_ Planos\_\_\_  
Retratos\_\_\_ Sin ilustraciones\_\_\_ Tablas o Cuadros\_X\_



<b>CÓDIGO</b>	<b>AP-BIB-FO-07</b>	<b>VERSIÓN</b>	<b>1</b>	<b>VIGENCIA</b>	<b>2014</b>	<b>PÁGINA</b>	<b>2 de 3</b>
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

**SOFTWARE** requerido y/o especializado para la lectura del documento:

**MATERIAL ANEXO:**

**PREMIO O DISTINCIÓN** (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*):

**PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:**

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Tratamiento de aguas	Water treatment	6.	
2. Contaminación	Pollution	7.	
3. Fitorremediación	Phytoremediation	8.	
4. <i>Lemna minor</i>	<i>Lemna minor</i>	9.	
5. Metales pesados: cromo, hierro, manganeso y zinc	<i>heavy metals: chromium, iron, manganese, zinc</i>	10.	

**RESUMEN DEL CONTENIDO:** (Máximo 250 palabras)

En este estudio investigativo se determinó la capacidad biorremediadora de la planta *Lemna minor* en el proceso de remoción de metales pesados, tales como: Cr, Fe, Mn, Zn. Para ello, empleo la macrófita ubicada en el humedal *La Sardinata*, del municipio de Palermo. Esta investigación se plantea como una solución ante la creciente problemática que rodea las fuentes hídricas, a causa de la contaminación por metales pesados, producto del vertimiento de aguas residuales. En donde, la capacidad de absorción de la macrófita *Lemna minor* en aguas contaminadas, actúa de forma favorable, posicionándose como herramienta útil en el tratamiento de agua residual.

El trabajo investigativo se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de naturaleza experimental, donde se recreó el agua contaminada artificialmente para llevar el estudio de forma precisa y controlada. Para la realización del trabajo experimental se dispone de diez acuarios, divididos en dos series, cada serie dispuesta de cuatro acuarios, para un total de ocho acuarios experimentales; y dos acuarios de control. La primera serie con un nivel de concentración de 1 ppm de metales pesados. Y la segunda serie con una concentración de 2 ppm. Los resultados muestran que el proceso de biorremediación luego de siete días, con el debido control de temperatura, humedad y fotoperiodos; muestran un porcentaje de remoción del 99%, analizado por EAA. Lo que evidencia claramente que el uso de macrófita



representa una inversión económica mínima y constituye una opción viable al momento de tratar los ecosistemas acuáticos afectados por la presencia de metales pesados.

**ABSTRACT:** (Máximo 250 palabras)

In this research study, the bioremediation capacity of the *Lemna minor* plant in the heavy metal removal process was determined, such as: Cr, Fe, Mn, and Zn. For this, I use the macrophyte located in the La Sardinata wetland, in the municipality of Palermo. This research is proposed as a solution to the growing problem surrounding water sources, due to heavy metal pollution, product of wastewater dumping. Wherein, the absorption capacity of the *Lemna minor* macrophyte in contaminated water acts favorably, positioning itself as a useful tool in the treatment of wastewater.

The research work was carried out under an experimental quantitative approach, where artificially contaminated water was recreated to carry out the study in a precise and controlled way. For the realization of the experimental work, ten aquariums are available, divided into two series, each series arranged with four aquariums, for a total of eight experimental aquariums; and two control aquariums. The first series with a concentration level of 1 ppm of heavy metals. And the second series with a concentration of 2 ppm. The results show that the bioremediation process after seven days, with due control of temperature, humidity and photoperiods; show a 99% removal percentage, analyzed by EAA. This clearly shows that the use of macrophytes represents a minimum economic investment and constitutes a viable option when treating aquatic ecosystems affected by the presence of heavy metals.

**APROBACION DE LA TESIS**

Nombre Presidente Jurado:

Firma:

Nombre Jurado:

Firma:

Nombre Jurado:

Firma:

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD BIORREMEDIADORA DE LA  
MACRÓFITA *LEMNA MINOR* EN AGUAS CONTAMINADAS CON  
METALES PESADOS.**

**JAVIER HERNANDO QUESADA DUQUE**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL  
NEIVA  
2019**

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD BIORREMEDIADORA DE LA  
MACRÓFITA *LEMNA MINOR* EN AGUAS CONTAMINADAS CON  
METALES PESADOS.**

**AUTOR**

**JAVIER HERNANDO QUESADA DUQUE**

**DIRECTOR**

**P.h.D. EDUARDO PASTRANA BONILLA**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL  
NEIVA  
2019**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Presidente

---

Jurado

---

Jurado

Neiva, 16 de diciembre de 2019

### **Dedicatoria**

A mi padre Hernando Quesada Valenzuela por ser apoyo y compartir conmigo en esta nueva etapa académica; a mi madre Leonor Duque Ramos por su infinito amor, cariño y comprensión en todo momento. A mi hijo Juan Camilo Quesada Sánchez por ser el motor que impulsa cada uno de mis pasos y logros. A mis amigos y colegas por apoyar y estar presentes día a día en mi vida. A todos y cada uno por ser fuente de inspiración en hacer realidad este sueño: mi tesis como maestrante.

## **Agradecimientos**

A nuestros colegas docentes Eduardo Pastrana Bonilla, Alcides Polanía Patiño y María Natalia Montañez Velásquez, por su apoyo incondicional en el desarrollo de esta investigación, por su gran motivación y pertinente asesoría; ustedes han sido la clave para la culminación de este proyecto, gracias por todo.

## Resumen

El trabajo de investigación denominado: Evaluación de la capacidad biorremediadora de la macrófita *Lemna minor* en aguas contaminadas con metales pesados fue desarrollado en la ciudad de Rivera, del departamento del Huila; con el fin de determinar la capacidad biorremediadora de la planta *Lemna minor*, en el proceso de remoción de metales pesados como el cromo, el hierro, el manganeso y el zinc. Esta investigación se plantea como una solución ante la problemática que enmarca la exposición de agentes contaminantes por metales pesados en los ecosistemas acuáticos, producto de las aguas residuales. En donde, la capacidad de absorción de macrófita *Lemna minor* en aguas contaminadas, actúa de forma favorable y como herramienta útil en el tratamiento de agua residual, posicionándose como una tecnología limpia y ecológicamente sostenible.

Dentro del proceso investigativo se recreará el agua en condiciones de origen industrial, es decir utilizando agua destilada y contaminándola artificialmente para llevar el estudio de forma precisa y controlada. Se dispone de diez acuarios, dispuestos en dos series de cuatro acuarios cada una, y 2 acuarios de control. La primera serie contiene 4 acuarios denominados de la A1 a la A4, los cuales contienen un nivel de concentración de 1,0 mg/L (1ppm) de metales pesados como: cromo, hierro, manganeso y zinc respectivamente. Mientras que la segunda serie contiene otros 4 acuarios enumerados de A5 hasta A8 con los mismos metales pesados, solo que con una concentración de 2,0 mg/L (2ppm). El acuario control A9 contiene la macrófita, sin la presencia de metales pesados, que indica o permite medir el nivel de evaporación del agua. Mientras que la A10 contiene todos los metales pesados, con la diferencia que no contiene *Lemna minor*.

La cantidad de *Lemna minor* que se utilizó en los 8 acuarios de las 2 series, más el acuario control A9 es de 1.134 g de peso en seco, cada uno con 126 g de la macrófita.

El proceso de biorremediación se evaluó en un periodo de tiempo de siete días, controlando la temperatura, la humedad y los fotoperiodos. Al término del séptimo día se filtraron y se les realizó digestión ácida a las nueve muestras de agua provenientes de los acuarios experimentales y el de control que contenía la macrófita, con el fin de retirar cualquier rastro de material vegetal y de oxidar los metales evitando interferencias al momento de la lectura. Se almacenaron en viales oscuros para conservar las muestras y evitar reacciones fotovoltáicas; dichas muestras se analizaron con un equipo de absorción atómica Thermo Scientific de referencia ICE 3000 Series AA acoplado a un horno de grafito de referencia GFS33, los porcentajes de remoción se determinaron con la ecuación:  $\%R = (S_0 - S) / S_0 \times 100$ . Una vez establecidos los datos por el análisis por espectrofotometría, se concluye que la técnica no convencional para el tratamiento de aguas residuales al obtener porcentajes de remoción de un 99%, en periodos de tiempo de siete días, a través de una inversión económica mínima, representa una opción viable al momento de tratar los ecosistemas acuáticos afectados por la presencia de metales pesados.

Donde el tratamiento de estos ecosistemas, requiere más de interés de conservación que de patrocinio económico de la empresa pública y privada.

**Palabras Claves:** Tratamiento de aguas, contaminación, fitorremediación, *Lemna minor*, metales pesados: cromo, hierro, manganeso, zinc.

### Abstract

The research work called: Evaluation of the bioremediation capacity of the *Lemna minor* macrophyte in waters contaminated with heavy metals was developed in the city of Rivera, in the department of Huila; in order to determine the bioremediation capacity of the *Lemna minor* plant, in the process of removal of heavy metals such as chromium, iron, manganese and zinc. This research is proposed as a solution to the problem that frames the exposure of heavy metal pollutants in aquatic ecosystems, a product of wastewater.

Wherein, the absorption capacity of *Lemna minor* macrophyte in contaminated water acts favorably and as a useful tool in wastewater treatment, positioning itself as a clean and ecologically sustainable technology. Within the investigative process, water will be recreated under conditions of industrial origin, that is, using distilled water and artificially contaminating it to carry out the study in a precise and controlled manner. Ten aquariums are available, arranged in two series of four aquariums each, and 2 control aquariums. The first series contains 4 aquariums called A1 to A4, which contain a concentration level of 1.0 mg / L (1ppm) of heavy metals such as chromium, iron, manganese and zinc respectively. While the second series contains another 4 aquariums listed from A5 to A8 with the same heavy metals, only with a concentration of 2.0 mg / L (2ppm). The control aquarium A9 contains the macrophyte, without the presence of heavy metals, which indicates or allows to measure the evaporation level of the water. While the A10 contains all heavy metals, with the difference that *Lemna minor* does not contain.

The amount of *Lemna minor* that was used in the 8 aquariums of the 2 series, plus the A9 control aquarium is 1,134 g dry weight, each with 126 g of the macrophyte. The bioremediation process was evaluated over a period of seven days, controlling the temperature, humidity and photoperiods. At the end of the seventh day, the nine water

samples from the experimental aquariums and the control contained in the macrophyte were filtered and acid digested, in order to remove any trace of plant material and to oxidize the metals avoiding interference at the time of reading. They were stored in dark vials to preserve the samples and avoid photovoltaic reactions; said samples were analyzed with a Thermo Scientific atomic absorption equipment of reference ICE 3000 Series AA coupled to a graphite furnace of reference GFS33, the removal percentages were determined with the equation:  $\% R = (S_0 - S) / S_0 \times 100$  Once the data is established by the spectrophotometry analysis, it is concluded that the unconventional technique for the treatment of wastewater by obtaining removal percentages of 99%, in periods of seven days, through a minimum economic investment, represents a viable option when treating aquatic ecosystems affected by the presence of heavy metals.

Where the treatment of these ecosystems requires more conservation interest than economic sponsorship of public and private companies

**Keywords:** Water treatment, pollution, phytoremediation, *Lemna minor*, heavy metals: chromium, iron, manganese, zinc

## Contenido

	<i>Pág.</i>
Resumen.....	4
Abstract.....	6
Introducción.....	14
1. Descripción del Problema de Investigación.....	17
1.1 Planteamiento del Problema y Justificación.....	17
1.1.1 Pregunta de investigación.....	19
1.2. Objetivos.....	19
1.2.1. Objetivos Generales.....	19
1.2.2. Objetivos específicos.....	19
2. Antecedentes y Marco Teórico.....	20
2.1. Antecedentes.....	20
2.1.1 Origen del tratamiento de las aguas.....	20
2.1.2 Proceso del tratamiento del agua durante el Siglo XXI.....	23
2.1.3 Estudios sobre tratamiento de agua con macrófitas.....	23
2.1.4. Estudios sobre remoción de metales pesados presentes en aguas residuales con la <i>Lemna minor</i> (lenteja de agua).....	24
2.1.5. Estudios sobre remoción de cromo (Cr).....	27
2.1.6 Estudios sobre remoción de hierro (Fe).....	28
2.1.7. Estudios sobre remoción de Manganeseo (Mn).....	29
2.1.8. Estudios sobre remoción de zinc (Zn).....	30
2.2. Marco Teórico.....	31
2.2.1 Plantas Acuáticas o macrófitas.....	31
2.2.1.1 Plantas flotantes.....	32
2.2.1.2 <i>Lemna minor</i> (Lenteja de Agua o Duckweed).....	33
2.2.2 La <i>Lemna minor</i> en el tratamiento de aguas residuales.....	36
2.2.3 Fitorremediación.....	36
2.2.3.1 Fiotecnologías.....	37
2.2.3.2. Fitoextracción o fitoacumulación en la <i>Lemna minor</i> .....	41
2.2.4. Técnicas de medición.....	42
2.2.4.1. Espectrofotometría de Absorción atómica (EAA).....	42
2.2.4.2. Componentes de un espectrofotómetro de absorción atómica.....	44
2.2.4.3. Tipos de Lámparas usadas en el espectrofotómetro de absorción atómica.....	45
2.2.4.3.1 Lámparas de cátodo hueco.....	45
2.2.4.3.2. Lámparas multielementos.....	46
2.2.4.3.3. Lámpara de descarga sin electrodos.....	46
2.3 Química del Agua y su Importancia.....	47
2.4 Contaminación.....	47
2.4.1 Aguas residuales.....	48
2.4.2 Tipos de contaminante.....	49
2.4.2.1 Contaminantes orgánicos.....	49
2.4.2.2 Contaminantes inorgánicos.....	49

2.5. Metales Pesados.....	49
2.5.1 Metales con función biológica. ....	50
2.5.2 Metales sin función biológica. ....	50
2.5.3 Química de los metales pesados.....	51
2.5.4 Cromo (Cr). ....	51
2.5.5 Hierro (Fe). ....	52
2.5.6 Manganeseo (Mn). ....	53
2.5.7 Zinc (Zn). ....	54
3. METODOLOGÍA .....	56
3.1. Enfoque y diseño metodológico .....	56
3.2. variables.....	57
3.3. Espacio Geográfico.....	58
3.4. Población y Muestra .....	59
3.4.1. Población.....	59
3.4.2. Muestra.....	60
3.5. Procedimiento.....	60
3.5.1. Fase inicial.....	60
Etapa 1: recolección de la <i>Lemna minor</i> . ....	60
Etapa 2: traslado de la <i>Lemna minor</i> . ....	60
Etapa 3: Adecuación del laboratorio, observación y monitoreo y creación de semilleros. ...	61
3.5.2. Fase experimental.....	62
Etapa 1: preparación de disoluciones de los metales objeto de estudio.....	62
Etapa 2: Siembra de la <i>Lemna minor</i> en los acuarios experimentales. ....	66
3.5.3. Fase final.....	69
Etapa 1. Procedimiento de análisis y procesamiento de datos y cálculo de resultados. ....	69
Etapa 2. Análisis de las 10 muestras de agua provenientes de los ocho acuarios experimentales y de los dos acuarios de control por medio de la espectrofotometría de absorción atómica. ....	70
Etapa 3. Validación del método.....	70
Etapa 4. Determinación de los porcentajes de remoción de los metales pesados.....	71
Etapa 5. Análisis estadístico. ....	72
4. HALLAZGOS.....	73
4.1. Remoción de Cromo .....	73
4.2. Remoción de Hierro.....	77
4.3. Remoción de Manganeseo.....	80
4.4. Remoción de Zinc.....	84
5. DISCUSIONES.....	88
6. CONCLUSIONES .....	92
BIBLIOGRAFÍA .....	96

**Lista de Figuras**

	<i>Pág.</i>
Figura 1. Ilustración anatomía de la <i>Lemna minor</i> .....	34
Figura 2. Grupo de <i>Lemna minor</i> (Lenteja de agua).....	34
Figura 3. <i>Lemna minor</i> solitaria (Lenteja de agua).....	35
Figura 4. Grupo <i>Lemna minor</i> en su hábitat natural. ....	35
Figura 5. Fitorremediación.....	40
Figura 6. Esquema de la espectrofotometría de absorción atómica.....	43
Figura 7. Espectrofotómetro ICE 3000 AA acoplado con horno de grafito GFS33.....	45
Figura 8. Área superficial de la <i>Lemna minor</i> .....	59

## Lista de Tablas

	<i>Pág.</i>
Tabla 1. Clases de fitotecnologías .....	40
Tabla 2. Determinación de variables .....	57
Tabla 3. Caracterización del contenido de acuarios con sus respectivas concentraciones	68
Tabla 4. Metales pesados con Digestión.....	71
Tabla 5. Resultados biorremediación de Cromo, analizados por la EAA.....	74
Tabla 6. Análisis estadístico ordinario unidireccional ANOVA para Cr por EAA.....	74
Tabla 7. Cálculo para determinar el % de remoción de Cromo en acuario A1 .....	76
Tabla 8. Cálculo para determinar el % de remoción de Cromo en acuario A5 .....	77
Tabla 9. Resultados biorremediación de Hierro, analizados por la EAA .....	77
Tabla 10. Análisis estadístico ordinario unidireccional ANOVA para Fe por EAA .....	78
Tabla 11. Cálculo para determinar el % de remoción de Hierro en acuario A2 .....	80
Tabla 12. Cálculo para determinar el % de remoción de Hierro en acuario A6.....	80
Tabla 13. Resultados biorremediación de Manganeso, analizados por la EAA .....	81
Tabla 14. Análisis estadístico ordinario unidireccional ANOVA para Mn por EAA .....	81
Tabla 15. Cálculo para determinar el % de remoción de Manganeso en acuario A3 .....	83
Tabla 16. Cálculo para determinar el % de remoción de Manganeso en acuario A7 .....	84
Tabla 17. Resultados biorremediación de Zinc, analizados por la EAA .....	84
Tabla 18. Análisis estadístico ordinario unidireccional ANOVA para Zn por EAA.....	85
Tabla 19. Cálculo para determinar el % de remoción de Zinc en acuario A4 .....	87
Tabla 20. Cálculo para determinar el % de remoción de Zinc en acuario A8 .....	87
Tabla 21. Porcentaje de remoción de metales pesados: Cr, Fe, Mn, Zn.....	92

**Lista de graficas**

	<i>Pág.</i>
Gráfica 1. Resultados biorremediación de Cromo.....	75
Gráfica 2. Resultados biorremediación de Hierro.....	78
Gráfica 3. Resultados biorremediación de Manganeseo.....	82
Gráfica 4. Resultados biorremediación de Zinc.....	85
Gráfica 5. Porcentaje de remoción de metales pesados con <i>Lemna minor</i> .....	93

## Lista de Anexos

	<i>Pág.</i>
ANEXOS .....	105
ANEXO 1. Resultados obtenidos de Cromo por espectroscopia de absorción atómica.....	105
ANEXO 2. Resultados obtenidos de Hierro por espectroscopia de absorción atómica. ...	106
ANEXO 3. Resultados obtenidos Manganese por espectroscopia de absorción atómica ..	107
ANEXO 4. Resultados obtenidos de Zinc por espectroscopia de absorción atómica. ....	108
ANEXO 5. Proceso de fitorremediación de los metales pesados: cromo, hierro, manganeso y zinc, por medio de la planta <i>Lemna minor</i> con luz natural.....	109
ANEXO 6. Proceso de fitorremediación de los metales pesados: cromo, hierro, manganeso y zinc, por medio de la planta <i>Lemna minor</i> con luz led. ....	109
ANEXO 7. Proceso de fitorremediación de los metales pesados: cromo, hierro, manganeso y zinc, por medio de la planta <i>Lemna minor</i> con luz led. ....	110
ANEXO 8. Proceso de fitorremediación de los metales pesados: cromo, hierro, manganeso y zinc, por medio de la planta <i>Lemna minor</i> con luz led. ....	110
ANEXO 9. Proceso de fitorremediación de los metales pesados: cromo, hierro, manganeso y zinc, por medio de la planta <i>Lemna minor</i> con luz led. ....	111
ANEXO 10. Proceso de filtración del agua después de 7 días de fitorremediación con la planta <i>Lemna minor</i> .....	111
ANEXO 11. Proceso de filtración del agua después de 7 días de fitorremediación con la planta <i>Lemna minor</i> .....	112
ANEXO 12. Proceso de filtración del agua después de 7 días de fitorremediación con la planta <i>Lemna minor</i> .....	112
ANEXO 13. Recipientes plásticos de color ámbar para transportar 10 mL el agua producto de la fitorremediación de la planta <i>Lemna minor</i> .....	113
ANEXO 14. Recipientes plásticos de color ámbar para transportar 10 mL el agua producto de la fitorremediación de la planta <i>Lemna minor</i> .....	113

## Introducción

La presente investigación denominada: Evaluación de la capacidad biorremediadora de la macrófita *Lemna minor* en aguas contaminadas con metales pesados, se desarrolló en el municipio de Rivera, del departamento del Huila, haciendo parte del programa de estudios de la Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Surcolombiana.

Este proceso se elaboró en torno a dar respuesta a una problemática que se encuentra exponencialmente vigente en el departamento del Huila, la cual es la contaminación de diferentes ecosistemas acuáticos y terrestres con aguas residuales (doméstica, comercial o industrial); dentro de este proceso se recreó el agua destilada en condiciones de origen industrial contaminándola artificialmente con los metales pesados que son objeto de estudio en esta investigación, todo ello apreciándose el impacto negativo de estos, en los ecosistemas y en la salud del ser humano.

El propósito de esta investigación es disminuir la concentración de estos contaminantes presentes en el agua por medio de un tratamiento de fitorremediación apoyado en la planta *Lemna minor* y así presentar una opción económica, práctica y eficaz para la depuración de aguas contaminadas con metales pesados.

La información se recolectó mediante técnicas propias del método cuantitativo, la investigación por ser de tipo investigación *in vitro*, tuvo que ser realizada en un laboratorio para poder desarrollar los procesos de observación y de medición científica denominado: Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA), el cual se realizó mediante el equipo de absorción atómica Thermo Scientific de referencia ICE 3000 Series AA acoplado a un horno de grafito de referencia GFS33.

El proceso de recolección de las plantas se realizó en el humedal *La Sardinata* del municipio de Palermo, Huila; se transportaron al laboratorio de química del programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad Fundación Escuela Tecnológica (FET) del municipio de Rivera, durante los tres meses siguientes se realizó un semillero con el fin de eliminar cualquier residuo o contaminante que estuviera presente en la planta.

Al término del séptimo día se filtraron y se les realizó digestión ácida a las nueve muestras de agua provenientes de los acuarios experimentales y de control; dichas muestras se analizaron con un equipo de absorción atómica Thermo Scientific de referencia ICE 3000 Series AA acoplado a un horno de grafito de referencia GFS33, los porcentajes de remoción se determinarán con la ecuación de carga contaminante:

$$\%R = \frac{S_o - S}{S_o} \times 100$$

Dónde:

%R: Porcentaje de remoción

So: Carga contaminante inicial (del agua contaminada artificialmente durante el proceso en el laboratorio) (mg/L)

S: Carga contaminante final (del agua después del proceso de fitorremediación) (mg/L)

(Katz & Salem, 1994, p. 80); (Kabata Pendias & Pendias, 2001, p. 386); (Khellaf & Zerdaoui, 2009, p. 164); (Hassan & Aarts, 2011, p. 57); (Khataee, Movafeghi, Torbati, Salehi, & Zarei, 2012, p. 297); (Garcia, Matamoros, Fontás, & Salvadó, 2015, p. 2332); (Kösesakal, Ünal, Memon, & Yuksel, 2016, p. 472)

El análisis de estos resultados (tablas y gráficas) se efectuó por medio de un análisis estadístico ANOVA a través del *software GraphPad Prism 6*; dichos resultados se compararon con el referente teórico consignado en esta propuesta de investigación y

posteriormente se realizaron las discusiones y conclusiones pertinentes, las cuales serán expuestas respectivamente en el acápite pertinente a estas.

El trabajo investigativo consta de 4 capítulos, en los que se denotan: el primero, problema de investigación, justificación y objetivos; el segundo capítulo presenta los antecedentes y referentes teóricos sobre los que se soporta el estudio. El capítulo tercero hace referencia a la metodología empleada, enfoque cuantitativo orientado las fases de diseño, la elección de la muestra, la recolección y sistematización de los resultados. En el capítulo cuarto se muestran los hallazgos, análisis y conclusiones, resaltando que se elaboró un texto específico para cada experiencia registrada con los metales pesados empleados, mostrando de forma puntual los datos obtenidos.

## 1. Descripción del Problema de Investigación

### 1.1 Planteamiento del Problema y Justificación

Durante varios años se ha venido haciendo visible el enorme deterioro del ambiente y en específico de los ecosistemas acuáticos, lo que ha generado la toma de conciencia sobre la contaminación con metales pesados en el ambiente, la presencia de algunos agentes contaminantes metálicos como los que son objeto de estudio en esta investigación (cromo, hierro, manganeso y zinc) en el aire, el agua y el suelo son consecuencia de diversas actividades antropogénicas; dichos elementos se consideran metales pesados y tóxicos cuando su densidad oscila entre 4000 a 7000 Kg/m<sup>3</sup> (Rodríguez, 2017, p. 2) y pueden afectar de manera nociva los organismos vivos, dado a que su movilidad en el ambiente es muy lenta y tiende a bioacumularse, de igual forma las concentraciones suelen ser tóxicas e incluso cancerígenas (Vallejo, et al., 2016, p. 17); (Doménech & Peral, 2008, p. 239); (Kumar, Ramalingam, Sathyaselvabala, Kirupha, Murugesan, & Sivanesan, 2012, p. 764)

Dicho proceso de deterioro se ha evidenciado de forma progresiva, en países como Afganistán, Chad, Tayikistán, Ucrania, República Democrática del Congo, Papúa, Guinea, Mozambique, Mongolia, Madagascar y Haití (Arauzo, Rivera, Valladolid, Noreña, & Cedenilla, 2003, p. 88) situación que es aceptada y promovida por las legislaciones nacionales que permiten el atropello ambiental de las industrias mineras, galvanoplásticas, siderúrgicas, de fundición, aleaciones y curtición de pieles (Eaton, Clesceri, Rice, Greenberg, & Franson, 2005, p. 1325); (García & Dorronsoro, 2005, p. 88); (Alegría, Ocampo, Rodríguez, & Forlerer, 2016, p. 145)

Es así, como a partir del creciente deterioro de los ecosistemas acuáticos a manos de la exposición de metales pesados, se hace imperativo generar una técnica sostenible, que permita la regeneración masiva y acelerada del medio ambiente. En este caso específico, del agua, que ha sido contaminada con sustancias tóxicas, causando afectaciones a la salud de personas y demás organismos de la naturaleza. Todo esto, por medio de la capacidad biorremediadora de la *Lemna minor*. De igual forma, al paso de los años se han desarrollado diferentes tecnologías no convencionales para el tratamiento de aguas residuales, que resultan ser amigables con el ambiente, de bajo costo y de fácil mantenimiento. Tal es el caso de la macrófita *Lemna minor*, la cual representa una opción a la hora de buscar tecnologías para la remoción de contaminantes en cuerpos de agua (Valero, 2006, p. 55). Las plantas acuáticas o macrófitas, han sido identificadas como un grupo potencialmente útil para la acumulación y eliminación de una gran variedad de contaminantes, debido a su capacidad biorremediadora; considerándose como una alternativa significativa para el tratamiento de aguas residuales y el rescate de los ecosistemas acuáticos (Valero, 2006, p. 56)

La lenteja de agua *Lemna minor* es una planta de flotación libre con una amplia distribución en los diferentes tipos de ecosistemas acuáticos, a pesar de su pequeño tamaño, presenta un gran potencial de reproducción vegetativa que infiere un alto crecimiento de su biomasa y que podría llegar a ser un aporte y/o solución significativa frente al problema mencionado anteriormente (Ziegler, Adelman, Zimmer, & Appenroth, 2015, p. 36); (Descalcificador, 2018)

El tratamiento de aguas residuales previo a su vertido en los ríos no existe actualmente en el departamento del Huila, como ya se dijo con anterioridad, esta falta de tratamiento puede acarrear problemas serios en la calidad de vida de los huilenses; motivo

por el cual se valora significativamente los aportes al tratamiento del agua realizado por la *Lemna minor*.

### **1.1.1 Pregunta de investigación.**

¿Cuál es la capacidad fitorremediadora de la macrófita *Lemna minor* en la remoción de aguas contaminadas *in vitro* con metales pesados como: hierro, cromo, manganeso y zinc?

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivos Generales.**

- Evaluar la capacidad biorremediadora de la *Lemna minor* en el proceso de remoción de metales pesados: cromo, hierro, manganeso y zinc en aguas contaminadas, a través de una experiencia *in vitro*.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Determinar mediante espectrofotometría de absorción atómica, los porcentajes de remoción de metales pesados en aguas contaminadas de forma *in vitro*, una vez se ha empleado la capacidad biorremediadora de la macrófita *Lemna minor*.
- Identificar las ventajas del uso de la macrófita *Lemna minor* como fitotecnología limpia y sostenible, en la reparación de ecosistemas acuáticos, afectados por la presencia de metales pesados.

## 2. Antecedentes y Marco Teórico

### 2.1. Antecedentes

#### 2.1.1 Origen del tratamiento de las aguas.

Desde la prehistoria, la raza humana se ha sentido interesada por almacenar y distribuir el agua para su consumo y desarrollo de sus actividades cotidianas. El hombre primitivo conocía su importancia y por eso buscaba habitar cerca de cuerpos de agua y zonas de lluvia. Asimismo, cuando el hombre se estableció en el sedentarismo busco la manera de construir pozos subterráneos, para conservar el agua y suplir sus necesidades cotidianas.

Hace 7000 años atrás en Jericó y Mesopotamia los pozos eran una moda popular, generando nuevos sistemas de transporte y distribución de agua; en el año 3000 a.C en Mohenjo-Daro (actual Pakistán) se construyeron los primeros sistemas para baños públicos y agua caliente. Posteriormente se empezó a utilizar tuberías huecas para transportar el agua, muy parecidas a las que existen en la actualidad. En Egipto utilizaban los troncos de las palmeras y en el lejano oriente los troncos de la planta del bambú. Sin lugar a duda Egipto fue el país precursor de los sistemas de “curación del agua” alrededor de los años 1.500 a.C., estos mismos señalan que las maneras más frecuentes en la purificación del agua eran: hirviéndola sobre el fuego, elevando la temperatura haciendo uso de la luz solar o introduciendo metales calientes dentro de los cuerpos de agua. Sumado a esto se complementaban con un filtrado de arena y grava para después dejarla enfriar (Descalcificador, 2018); (Lenntech, 2018)

En la Grecia primitiva, el agua producto de las lluvias, ríos y de escorrentías eran almacenadas en pozos para ser utilizadas. Debido al crecimiento acelerado de la población se vieron en la obligación de desarrollar técnicas más eficientes para el almacenamiento,

tratamiento y distribución del agua, lo que conllevó a la construcción de sistemas de distribución de grandes dimensiones utilizando materiales como objetos cerámicos, maderistas o metálicos. El verdadero aporte por parte de la civilización griega fue su claro interés en la calidad del agua que consumían, además de un sistema de recolección de aguas de desecho. En la antigua Roma también el agua era almacenada y purificada a través de embalses de aireación; diseñando arquitecturas y construcciones de redes de distribución del agua. Cuando el imperio romano cayó no se volvieron a utilizar, por eso entre los años 500 y 1500 d.C hubo poco desarrollo en este sector de acuerdo a las estrategias para tratar el agua, situación que se volvió caótica en la edad media, debido a que el agua no volvió a ser tratada generando problemas de higiene; generalmente, las poblaciones pobres que bebían aguas sin tratar en este periodo de la historia enfermaban y morían (Descalcificador, 2018); (Lenntech, 2018)

En 1804 John Gibbs, elaboró el primer filtro de agua en la ciudad de Paisley, Escocia, solo hasta 1806 en París, Francia se da el funcionamiento a lo que sería la precursora de las plantas de tratamiento de aguas, haciendo uso de arena y carbón como filtros. James Simplón en el año de 1827 crea el primer filtro de arena para purificar el agua que sea apta para consumo humano. A puertas del año 1900 en el continente europeo se dio a conocer un proceso complejo de filtración cadenciosa sobre arena, como un método efectivo para eliminar las partículas suspendidas en el agua, sin embargo, no se podía medir el grado de calidad de esta debido a los pocos avances tecnológicos y esto ocasionó que numerosas crisis en salud tales como el cólera se transmitieran por la contaminación de los pozos públicos afectados por aguas de desecho. Luis Pasteur en 1888 explicó cómo los microorganismos tenían el potencial de transmitir diferentes “males y afecciones” a través del agua, descubriendo que la turbiedad no solo era una situación estética ya que en ella

estaban presentes sustancias como las heces fecales que podían servir como medio para el transporte de estos microorganismos, fue así como el proceso de filtración se utilizó para eliminar la turbiedad, se comenzaron a utilizar varios desinfectantes como el cloro y el ozono, los cuales jugaron un papel en la minimización en la reducción de numerosos brotes de enfermedades.

A medida que fue avanzando la ciencia y la historia, se fueron descubriendo diferentes especies químicas disueltas en el agua que se utilizaba para consumo humano proveniente de diferentes efluentes principalmente de industrias, generando un notable impacto negativo y coaccionando cada vez más al uso de nuevas técnicas más eficaces y elaboradas para la curación del agua (coagulación, floculación, filtración, sedimentación, cloración y ozonificación), y en ocasiones no eran tan efectivas debido al surgimiento de nuevos contaminantes, lo que llevó a la complementación con diferentes técnicas (electrocoagulación, nanofiltración, intercambio iónico, fotocatalisis, electrodiálisis etc.), ocasionando que diferentes países crearán nuevas legislaciones ambientales y diferentes requerimientos técnicos para salvaguardar la salud de las personas (Veliz, Guadalupe , Fernández, & Bataller, 2016, p. 18)

*“La filtración y la desinfección con cloro del agua potable han sido responsables del 50% del aumento de la expectativa de vida en los países desarrollados durante el siglo XX, este hecho motivó a la revista Life a citar recientemente a la filtración y la cloración del agua potable como probablemente el más significativo avance en salud pública del milenio. Antes de la llegada de la cloración para el tratamiento de agua potable, aproximadamente 25 de cada 100.000 personas morían anualmente en los Estados Unidos a causa de la fiebre tifoidea”* (Descalcificador, 2018); (Lenntech, 2018)

Actualmente la ozonización y el desarrollo de membranas para osmosis inversa son los procesos vanguardistas más significativos con respecto al tratamiento de aguas (Descalcificador, 2018); (Lenntech, 2018)

### **2.1.2 Proceso del tratamiento del agua durante el Siglo XXI.**

Actualmente en las plantas de tratamiento de aguas potables (PTAP) desarrollan diferentes procesos (físicos, químico y biológicos) para potabilizar, distribuir y depositar las aguas captadas que ingresan a las plantas. El siglo XXI se ha caracterizado por la eliminación de diferentes tipos de contaminantes (orgánicos e inorgánicos) y microorganismos que deterioran las condiciones fisicoquímicas y organolépticas del agua que podrían causar diferentes enfermedades y originar problemas de salud pública. Las PTAP tienen la función de garantizar un líquido que cuente con una calidad sanitaria garantizada (Lozano, 2017, p. 7)

### **2.1.3 Estudios sobre tratamiento de agua con macrófitas.**

Existe literatura que hace referencia a cómo las macrófitas se utilizan como sistemas naturales para la biorremediación de aguas residuales. La gran mayoría ha evidenciado altas tasas de remoción de diversos contaminantes que se encuentran disueltos en las aguas residuales, y han especificado que el Jacinto de agua es la especie de planta de mayor aplicación a procesos de tratamiento de agua. Los diseños experimentales dependen del modelo que se quiera utilizar, por ejemplo: sistema de especies flotantes, filtro de macrófitas en flotación; o humedales con macrófitas emergentes. Para optimizar los procesos de remoción de contaminantes se debe realizar un retiro periódico de las plantas, esto conlleva a una limitación del proceso, si no se tiene un semillero ya consolidado. Para poder optimizar esta técnica de depuración de aguas es necesario orientar diferentes

esfuerzos científicos para poder entender y mejorar los mecanismos de biorremediación de estas especies vegetales.

Los procesos de depuración de aguas residuales que involucran a las macrófitas y en especial a las flotantes, han demostrado que son eficientes en el proceso de biorremediación de aguas con altos contenidos de nutrientes (fósforo y nitrógeno) materia orgánica y metales pesados como: arsénico, zinc, cadmio, cobre, plomo, cromo y mercurio; el potencial de estas plantas radica en que pueden ser empleadas en diferentes condiciones (económicas y ambientales) debido a su bajo consumo energético, fácil operación y simplicidad en el montaje (Lozano, 2017, p. 17); dentro de este grupo de las macrófitas flotantes es importante señalar que la *Lemna minor* tiene la capacidad de remover hasta en un 95% de los contaminantes presentes en las aguas residuales (Arroyave, 2004, p. 45)

Existe una investigación realizada junto a las instalaciones del camal municipal del Cantón, El Pangui ubicado en el barrio: La Recta, en el cual se fitorremediaban las aguas residuales generadas por el faenamiento del ganado vacuno y porcino. Para este proceso se utilizaron especies de la *Lemna minor* logrando una reducción de los SST (99,6%), cloruros (85,8%), aceites y grasas (98,9%), DBO (98,4%) y DQO (95,8%) (Ramos & Pineda, 2016, p. 4338)

#### **2.1.4. Estudios sobre remoción de metales pesados presentes en aguas residuales con la *Lemna minor* (lenteja de agua).**

La *Lemna minor* es una planta que se encuentra en varias regiones del planeta, especialmente en charcos de agua dulce, ciénagas, lagos y ríos calmados (Armstrong, 2003, p. 35); la *Lemna minor* es una planta acuática flotante que presenta un rápido crecimiento y una amplia distribución en las zonas tropicales y subtropicales del planeta (Roldán, 1992, p. 529)

Según varios autores las macrófitas son consideradas como una plaga debido a su acelerado crecimiento y a su poco control, tiende a invadir diferentes cuerpos de agua de corriente lenta (lagunas, lagos y embalses) propiciando la eutrofización y condiciones óptimas para la crianza de vectores transmisores de enfermedades (Zambrano, 1974, p. 90); (Cook & Gut, 1974, p. 560). Sin embargo, si las macrófitas reciben un manejo adecuado y se aprovecha su alta capacidad de reproducción, absorción de nutrientes y bioacumulación de contaminantes, se convierte en una alternativa ecológica y económicamente viable para la depuración de diferentes aguas residuales. Por ejemplo: desde 1988 la fábrica Imusa S.A., localizada en el municipio de Rionegro (Antioquia) utiliza canales con la macrófita *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua); presentando una eficiencia del 97% en la remoción de metales pesados y de 98% en la remoción de sólidos suspendidos (Roldan & Alvaréz, 2002, p. 60)

Para que el proceso de remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales sea eficiente, las macrófitas deben presentar con las siguientes características: alta proliferación, gran capacidad en la remoción de nutrientes y contaminantes, supervivencia en condiciones naturales adversas y fácil cosecha. La *Lemna minor* cumple todas estas características y debido a ello ha sido utilizada con cierta frecuencia en sistemas de tratamiento de aguas residuales (Olguin & Hernandez, 1998, p. 65)

En el departamento del Valle del Cauca, se describe un sistema de tratamiento de aguas agroindustriales provenientes de varias granjas porcinas. El sistema está conformado por un biodigestor, seguido de un canal de sedimentación, un canal con Jacinto de agua y por último un canal con lenteja de agua, reportando una disminución en el DBO del 39,67% y una reducción en los SST del 72,89% (Pedraza, 1997, p. 89); (Chara, 1998, p. 34)

También se estudió la capacidad de la *Lemna minor* en la remoción de fosfatos en condiciones de laboratorio por (Öbek & Hasar, 2002, p. 28), encontrando una disminución en la concentración de ortofosfato de 96,67% en un periodo de tiempo de 8 días.

En otra investigación se estudió el potencial de la lenteja de agua para acumular metales como el cadmio, cobre, cromo, níquel y plomo en condiciones de laboratorio. Los resultados demostraron que, la planta es un buen acumulador de Cd y Cu, un acumulador moderado de Cr y un mal acumulador de Ni y Pb. Concluyendo que debido al alto crecimiento que presenta la *Lemna minor* desarrolla una eficiente capacidad de bioacumulación de estos metales pesados presentes en aguas residuales (Zayed, 1998, p. 718)

También es importante considerar que los sistemas que utilizan macrófitas para el tratamiento de aguas residuales, presentan unas ventajas sobre los sistemas convencionales debido a su bajo costo de construcción, fácil operación y mantenimiento (Olguin & Hernandez, 1998, p. 65)

### 2.1.5. Estudios sobre remoción de cromo (Cr).

Existen diversos estudios sobre la remoción del cromo en las aguas a través de diversas y muy variadas técnicas, como es el caso de la experiencia registrada en la ciudad de Cartagena (Colombia) en la que se utilizó el exoesqueleto del camarón desechado por la industria para obtener Quitina y Quitosano con la utilización de reactivos comerciales de muy bajo costo; estos son biopolímeros de diversos usos entre los cuales se encuentran la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales, en esta experiencia se utilizó el Quitosano para la remoción de cromo hexavalente a partir de aguas residuales del proceso de galvanizado o cromado, logrando obtener una remoción total de un 99,98% (Pájaro & Diaz , 2012, p. 7)

Otras experiencias demuestran que se puede remover el cromo hexavalente por medio del hongo *Paecilomyces sp.*, se encontró que 1 g de biomasa fúngica remueve el cromo (VI) en concentraciones que oscilan entre los 100 y 1000 mg/L en un tiempo de operación comprendido entre una y tres horas de incubación y remueve completamente 297 mg Cr (VI)/g de tierra, además, como otro beneficio, puede usarse para descontaminar nichos acuáticos (Cardenas & Acosta, 2011, p. 12)

En lo que se refiere al tratamiento del agua usando el vetiver en la fitorremediación de aguas contaminadas con cromo, se encontró que en México se utilizó esta planta en el proceso de depuración de aguas residuales proveniente de la industria de curtiembre, la cual presenta altos valores de cromo ( $21.000 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) debido a que en el proceso se usa grandes cantidades de cromo para evitar la descomposición del cuero, esta planta puede absorber 3,49 ng de este metal (Torres, Cumana, Torrealba, & Posada, 2010, p. 12)

### 2.1.6 Estudios sobre remoción de hierro (Fe).

En lo que refiere a procesos e investigaciones sobre absorción de hierro a través de diversas plantas acuáticas, se halló una experiencia en las aguas residuales industriales producto del galvanizado en la ciudad de Barquisimeto, Venezuela; donde se utilizaron dos plantas la *Eichhornia crassipes* y la *Lemna minor*, en espacios distintos. Se encontró que la primera macrófita puede absorber hasta un 98,04 % del hierro encontrado en aguas residuales, mientras que la *Lemna minor* pueden absorber un 97,47%. Esta investigación concluyó que ambas plantas son una alternativa poderosa para la remoción de hierro en aguas residuales industriales que inicialmente poseen hasta un nivel de concentración de 1500,89 µg/mL (Matute, Capote, Montilla, Padrón, & Iglesias, 2014, p. 4)

En el 2017 se realizó una investigación haciendo un proceso de fitorremediación para el tratamiento de aguas ácidas de los pasivos ambientales mineros de la quebrada Mesa de Plata- Hualgayoc en Perú. Durante este ejercicio investigativo se usaron tres especies vegetales distintas: *Typha sp* (Totorá), *Cortaderia selloana* (Pasto de pampas) y *Eichhornia crassipes* (Jacinto de agua) encontrando como dato positivo una capacidad de absorción de hierro en la *Cortaderia Selloana* del 99% (Aguilar & Aguilar, 2017, p. 31)

Entre los referentes concernientes a los procesos, se registra un experimento realizado con la cáscara de banano, en La Paz, Bolivia, cerca del nevado Huayna Potosí, en el cual se han detectado altos niveles de contaminación como resultado de una intensa actividad minera ejecutada desde 1960 hasta la fecha, encontrando que las cáscaras de banano pueden depurar el agua contaminada con plomo, manganeso y hierro, hallados en las lagunas de Jankho Khota, Milluni Chico y Milluni Grande. Otros de los hallazgos de la cáscara de banano es la regulación del pH, incrementando la conductividad eléctrica del agua, este proceso es muy económico y alternativo (Gamarra, 2014, p. 92)

### 2.1.7. Estudios sobre remoción de Manganese (Mn).

Existe en México una experiencia que registra un proceso de remoción de manganeso en las fuentes de abastecimiento del país mexicano, ya que dichas fuentes contenían valores que excedían la norma oficial mexicana (NOM) para el consumo humano (NOM- 127-SSA). Los hallazgos de hierro y manganeso en los efluentes de agua eran una causante de distintos problemas económicos, técnicos y sociales, ya que el agua provenía de cuevas donde tenía incrustado hierro y manganeso en el interior de estas, además de pozos y tuberías, para el proceso de purificación, se filtró el agua haciendo uso de zeolita natural, tipo clinoptilolita recubierta con óxidos de manganeso, obteniendo remoción del 96% para el hierro y del 95% para el manganeso (Petrova, 1997, p. 15)

Existe otro estudio en el cual se busca identificar y caracterizar tres opciones distintas para la remoción de hierro y manganeso presentes en el agua para consumo humano, identificadas en redes, válvulas y micromedidores, las cuales formaban biopelículas al interior de las tuberías alterando el color, el sabor del agua, además de agregar la presencia de sólidos suspendidos, para esto se hizo uso de tecnologías de oxidación y filtración. El sistema piloto de oxidación - FGAS3 con fuentes subterráneas. Este proceso logró un nivel de eficiencia de remoción de 84% para el hierro y 90% para el manganeso. Sin embargo, la planta piloto de oxidación + FGAS2 con fuente superficial indicó una remoción menor de hierro (58%) y de manganeso (89%) (Restrepo, Sanchez, Galvis, Rojas, & Sanabria, 2017, p. 13)

Figura también una investigación donde se evaluó la capacidad de remoción del cromo y del manganeso haciendo uso *Eichhornia crassipes*; para lo cual se creó un humedal de flujo artificial mediante estas macrófitas en diferentes temperaturas y

ambientes (Vasquez & Marilia, 2015, p. 21). La remoción de estos metales fueron; cromo (68,7%), hierro (72,8%) manganeso (77,6%)

### **2.1.8. Estudios sobre remoción de zinc (Zn).**

En México se registra una experiencia en la remoción de metales pesados presentes en el agua: cadmio, níquel y zinc utilizando Zeolitas (piedras ricas en aluminosilicatos). Estos contaminantes se encuentran en las aguas residuales de origen industrial, principalmente de galvanoplastia reportando concentraciones de 33.800 mg/L de Zn, en el proceso de lavado y de 70 a 350 ng/L en el proceso de enjuague.

La presencia de Zn en los cuerpos de agua se debe a la presencia de este metal en las pinturas, plásticos, productos farmacéuticos y cosméticos. La industria minero-energética principalmente la que utiliza combustibles fósiles produce desechos que contienen cromo, vanadio y zinc. Dependiendo de las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua residual se sugieren diferentes tratamientos para remover y/o estabilizar los metales pesados, los más utilizados son: neutralización y precipitación química, adsorción por carbón activado, osmosis inversa, técnicas de explotación de espuma, evaporación, cementación, intercambio iónico, recuperación electrolítica de metales, entre otras. Las técnicas más recomendadas por su fácil operación y bajo costo son: la neutralización y el intercambio iónico (Pavón , Campos, & Olguin, 2001, p. 8)

En la industria minera y textil existe un reto importante en la eliminación de los metales tóxicos presentes en los efluentes industriales, ya que estos son los principales contaminantes de los ecosistemas. En la actualidad existen diferentes técnicas que se utilizan en la remoción de estos contaminantes, tales como el uso de microorganismos reductores de metal y polímeros sintéticos, el uso de estos biopolímeros han constituido un gran interés al ser obtenidos de fuentes naturales y su alta tasa de biodegradabilidad. Esta

investigación evaluó el porcentaje de remoción de los siguientes metales:  $Pb^{+2}$ ,  $Cd^{+2}$ ,  $Zn^{+2}$  a través de la pectina; la determinación de estos metales lo realizaron mediante espectrofotometría de absorción atómica y se obtuvieron los siguientes resultados con un  $pH=8$  se presentó una alta remoción de plomo (80%) y cadmio (90%) y con un  $pH=2$  el zinc presentó una remoción de (50%) (Salazar, Rojas, Morales, Solis, & Arévalo, 2013, p. 64)

## **2.2. Marco Teórico**

### **2.2.1 Plantas Acuáticas o macrófitas.**

Las plantas acuáticas o macrófitas cumplen un papel importante en los ecosistemas acuáticos, ya que brindan unas condiciones óptimas (alimento y protección) para el desarrollo de diversos organismos; para el ser humano son útiles en la agroindustria y en la fitorremediación de cualquier tipo de contaminante (orgánico e inorgánico) presentes en cualquier ecosistema (acuático o terrestre) (Arroyave, 2004, p. 35); (Cook & Gut, 1974, p. 560)

Las macrófitas crecen en la zona litoral de diferentes cuerpos de agua (lagos, lagunas, embalses, ríos); estas plantas se clasifican de acuerdo al hábitat y al ciclo de vida en emergentes, flotantes y sumergidas. Actualmente se han reportado y descrito 95 familias de plantas acuáticas, de las cuales 42 son dicotiledóneas, 30 son monocotiledóneas, 17 son briofitas y 6 son pteridofitas. El crecimiento de las plantas acuáticas está muy relacionado con su ciclo de vida, la topografía del lugar y la alta concentración de nutrientes (Fósforo y Nitrógeno) en el agua; cuando las condiciones para su crecimiento son óptimas se desarrollan extensas zonas de vegetación acuática, que son lugares de gran diversidad biológica, pero cuando la densidad poblacional de las macrófitas excede el límite, se

convierten en un problema ya que esa agua presenta pésima calidad para sustentar la vida y para el uso de cualquier actividad humana (Roldán G. , 2006, p. 529)

Las plantas acuáticas son más sensibles a los contaminantes que las plantas terrestres debido a que los contaminantes en especial los metales pesados son más solubles en el agua y propician su acumulación. Para reducir la contaminación del agua por metales pesados se utiliza una técnica no convencional, llamada fitorremediación, que consiste en el uso de plantas con el fin de reducir la concentración de los contaminantes (Appenroth & Krech, 2010, p. 220); (Hassan & Aarts, 2011, p. 57)

Las macrófitas se clasifican en tres grandes grupos: sumergidas, emergentes y flotantes. Las sumergidas son aquellas plantas que se encuentran adheridas al suelo del cuerpo del agua permaneciendo en el fondo, las emergentes son las que se encuentran en el litoral (interfase agua-suelo) y finalmente las plantas acuáticas que son objeto de este estudio, las “flotantes” de crecimiento superficial en el cuerpo hídrico. Estas plantas tienen la capacidad de crecer flotando libremente en el agua sin necesidad de arraigar (Roldán G. , 2006, p. 529)

#### ***2.2.1.1 Plantas flotantes.***

Las plantas flotantes son aquellas que se desarrollan en la superficie del agua especialmente en lagunas o en áreas que presentan un flujo lento de los ríos o quebradas, sus raíces pueden o no estar adheridas al fondo, por lo cual obtienen sus nutrientes directamente del agua a través de un sistema radicular, que es único en cada planta. Las plantas flotantes pueden absorber grandes cantidades metales, sustancias tóxicas y nutrientes disueltos en el agua a una gran velocidad, generar sombra disminuyendo la temperatura y los niveles de luz del agua.

Poseen hojas poliformes y variopintas, además de raíces que sirven de refugio y lugar de desove a peces y anfibios (Roldán G. , 2006, p. 530)

### **2.2.1.2 *Lemna minor* (Lenteja de Agua o Duckweed).**

La *Lemna minor* (lenteja de agua o duckweed) es una planta macrófita (acuática) angiosperma (planta con flores), monocotiledónea perteneciente a la familia *Lemnaceae*. Su cuerpo es vegetativo y es en forma de taloide, es decir, no se diferencian el tallo y las hojas, estructuralmente es una planta plana y de color verde de 2 a 4 milímetros de longitud y 2 milímetros de ancho, la cual presenta una sola raíz blanca (Cook & Gut, 1974, p. 560); (Raven, Evert, & Eichhorn, 1971, p. 830)

Según Cook & Gut (1974), el tallo ha sido interpretado de diversas maneras: un tallo modificado, una hoja o como parcialmente tallo y hoja. p.560

Otros autores consideran que el tallo corresponde a una hoja modificada que cumple las funciones del tallo, la hoja y el eje florífero (Instituto Gallach, 1984) citado por (Arroyave, 2004, p. 34). Como toda planta vascular acuática, está conformada por una parte flotante llamada fronda y una parte sumergida llamada raíz.

Según (Armstrong 2003, Instituto Gallach, 1984 citado Arroyave, 2004, p. 34) : “*La lenteja de agua es una planta monoica, con flores unisexuales. Las flores masculinas están constituidas por un solo estambre y las flores femeninas consisten en un pistilo formado por un solo carpelo. El perianto (conjunto de las hojas florales que forman la envoltura de la flor) está ausente. Las flores nacen de una hendidura ubicada en el borde de la hoja, dentro de una bráctea denominada espata, muy común en las especies del orden arales. El fruto puede llegar a contener de 1 a 4 semillas; la forma de reproducción más común de esta planta es la asexual y la realiza por gemación, lo que la hace una planta de rápido crecimiento y la podemos encontrar en agregados de 2 a 4 individuos.*”

Esta planta se encuentra especialmente en la zona tropical y subtropical del planeta, que presentan un rango de temperatura entre los 5° y 30°C, pero su óptimo crecimiento está

entre los 15 y 18 °C, se adaptan fácilmente a cualquier condición de iluminación, es muy común encontrarla en cuerpos de agua dulce de flujo lento que sean ricos en nitratos y fosfatos (lagos, lagunas, charcos, ciénagas, embalses, ríos y quebradas) (Armstrong, 2003, p. 4); (Arroyave, 2004, p. 34); (Roldán G. , 2006, p. 530); (Rook , 2002, p. 215)



**Figura 1.** Ilustración anatomía de la *Lemna minor*. Sowerby. J. (1822). De; English Botany. Material de dominio público según la legislación norteamericana, porque fue publicado en enero de 1923. recuperado de: <http://www.iwate-kokyo.info/imagelgkl-lemna-gibba.shtml>



**Figura 2.** Grupo de *Lemna minor* (Lenteja de agua). Imagen fotográfica, tomada para los intereses pertinentes a esta investigación. sobre la mano. En el humedal *La Sardinata* del municipio de Palermo, Huila.



**Figura 3.** *Lemna minor* solitaria (Lenteja de agua). Imagen fotográfica, tomada para los intereses pertinentes a esta investigación. sobre dedo, en el humedal *La Sardinata* del municipio de Palermo, Huila.



**Figura 4.** Grupo *Lemna minor* en su hábitat natural. Imagen fotográfica, tomada para los intereses pertinentes a esta investigación, humedal *La Sardinata* del municipio de Palermo, Huila.

### **2.2.2 La *Lemna minor* en el tratamiento de aguas residuales.**

La *Lemna minor* en el tratamiento de aguas residuales tiene un campo de acción bastante significativo, debido a que es considerada como una de las angiospermas de más rápido crecimiento y de gran capacidad bioacumuladora de numerosos contaminantes, razón por la cual se ha venido utilizando en el proceso de tratamiento de aguas viciadas con metales pesados (Khellaf & Zerdaoui, 2009, p. 169); (Chaudhary & Sharma, 2012, p. 1616); (Şaşmaz, 2014, p. 247) además de productos farmacéuticos (García, Matamoros, Fontás, & Salvadó, 2015, p. 2329), pesticidas (Olette, Couderchet, Biagianti, & Eullaffroy, 2008, p. 1416), colorantes (Khataee, Movafeghi, Torbati, Salehi, & Zarei, 2012, p. 293), derivados del petróleo (Kösesakal, Ünal, Memon, & Yuksel, 2016, p. 468) y minerales (Öbek & Hasar, 2002, p. 27)

Por tener alta eficiencia, productividad, una alternativa ecológica y por su eficiencia en la remoción de nutrientes, metales y contaminantes esta planta ha sido considerada una herramienta útil para el tratamiento de aguas residuales en procesos como las técnicas de fitorremediación (Arroyave, 2004, p. 36)

### **2.2.3 Fitorremediación.**

Se denomina fitorremediación al conjunto de distintas tecnologías que remueven, reducen, transforman, mineralizan, degradan, volatilizan o estabilizan *in situ* o *ex situ* la concentración de diversos contaminantes por medio de procesos bioquímicos realizado por las plantas (en este caso la *Lemna minor*) y los microorganismos asociados a ellas. Estas tecnologías presentan ciertas ventajas sobre las técnicas convencionales, debido su bajo costo, fácil operación, amplia aplicabilidad y alta efectividad a través de la manipulación genética (Delgadillo, González, Prieto, Villagómez, & Acevedo, 2011, p. 598)

### **2.2.3.1 Fitotecnologías.**

Son técnicas que se basan en los procesos fisiológicos que realizan las plantas y los microorganismos asociados a ellas (Delgadillo, et al., 2011, p. 599) que dependiendo de las características del contaminante y de las condiciones del sitio se pueden clasificar en contención o eliminación (Thangavel & Subbhuraam, 2004, p. 110). En la *Tabla 1*. se presenta un resumen de las diferentes fitotecnologías, y en la *figura 6*. se esquematizan los mecanismos de remoción según su ubicación en la planta.

#### *a. Fitoextracción o fitoacumulación.*

La fitoextracción o fitoacumulación hace referencia al proceso mediante el cual la planta absorbe, transporta y almacena los agentes contaminantes inorgánicos disueltos en el agua por medio de un sistema radicular y vascular bien desarrollado (Delgadillo, et al., 2011, pp. 600-601); (Dietz & Schnoor, 2001, p. 165); (Frers, 2008, p. 305); (Ghosh, et al., 2005, pp. 5-6); (Ghori, et al., 2016, p. 390); (Watt & Evans, 1999, p. 320)

#### *b. Rizofiltración.*

La rizofiltración consiste en el uso de plantas hidropónicas que presentan una alta tasa de crecimiento, área superficial y un sistema radicular bien desarrollado con el fin de absorber, concentrar, almacenar y precipitar cualquier tipo de contaminante que se encuentre disuelto en el agua (Núñez, Meas, Ortega, & Olguín, 2004, p. 70); (Delgadillo, et al., 2011, p. 601); (Dietz & Schnoor, 2001, p. 165); (Frers, 2008, p. 305); (Ghosh, et al., 2005, pp. 5-6); (Ghori, et al., 2016, p. 390) a medida que la raíz vaya acumulando los contaminantes y alcance el punto de saturación, las plantas se cosechan y se procede a realizar su respectiva disposición final (Núñez, et al., 2004, p. 70); (Delgadillo, et al., 2011, p. 601)

c. *Fitoestabilización*

La fitoestabilización consiste en el uso de plantas que desarrollan un denso sistema radicular, (Dietz & Schnoor, 2001, p. 165); (Frers, 2008, p. 305); (Ghosh, et al., 2005, pp. 5-6); (Ghori, et al., 2016, p. 390) ya que en la rizosfera la planta ejerce un control hidráulico en la zona contaminada, propiciando las condiciones necesarias para inmovilizar o reducir la biodisponibilidad del contaminante en el ambiente a través de diferentes mecanismos físicos como: la secuestación, la lignificación, la absorción y la humidificación o por procesos químicos como la precipitación o la formación de complejos. En esta zona los contaminantes se fijan fuertemente a la raíz o se adhieren a la materia orgánica circundante disminuyendo su biodisponibilidad y la migración a ecosistemas aledaños (Núñez, et al., 2004, p. 70); (Delgadillo, et al., 2011, p. 601)

d. *Fitoestimulación*

En esta fitotecnología las plantas estimulan el crecimiento de microorganismos degradativos (principalmente hongos y bacterias) a través de exudados radiculares ricos en nutrientes y oxígeno que son transportados por su sistema vascular, desde la parte superior hasta la rizosfera (Núñez, et al., 2004, p. 70). Dichos microorganismos que están asociados al sistema radicular de la planta y tienen la capacidad de inmovilizar, inactivar y/o mineralizar una gran cantidad de contaminantes orgánicos hidrofóbicos como (hidrocarburos derivados del petróleo o hidrocarburos poliaromáticos) que la planta no puede incorporar a su metabolismo (Delgadillo, et al., 2011, pp. 600-601); (Dietz & Schnoor, 2001, p. 165); (Frers, 2008, p. 305); (Ghosh, et al., 2005, pp. 5-6); (Ghori, et al., 2016, p. 390)

e. *Fitovolatilización*

Esta técnica se configura en la capacidad que tienen algunas plantas de absorber y metabolizar los contaminantes presentes en el suelo y/o agua, a través de su sistema radicular, es en esta fase del proceso en la que los contaminantes son incorporados con celeridad al sistema vascular, siendo posteriormente transportados a las partes superiores de la planta, donde son liberados a la atmósfera en forma volátil, la cual es menos peligrosa para el ambiente; lo cual ocurre durante el proceso de transpiración vegetal (Delgadillo, et al., 2011, pp. 600-601); (Dietz & Schnoor, 2001, p. 165); (Frers, 2008, p. 305); (Ghosh, et al., 2005, pp. 5-6); (Ghori, et al., 2016, p. 390)

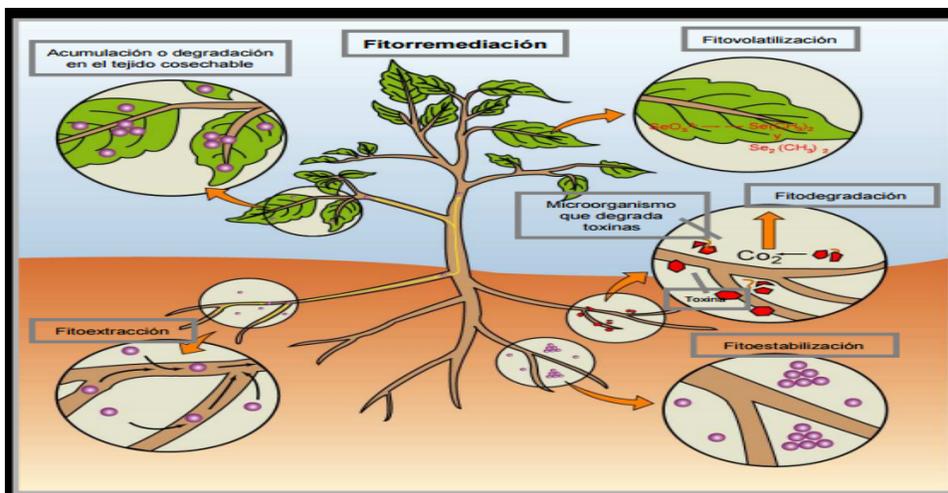
f. *Fitodegradación*

Esta técnica se basa en el uso de plantas que tienen la capacidad de degradar y/o transformar diversos contaminantes orgánicos (hidrocarburos derivados del petróleo y plaguicidas) en sustancias menos tóxicas. Dicho proceso ocurre en la rizosfera (zona del suelo asociada a las raíces de las plantas y a los microorganismos), en donde las raíces y los microorganismos asociados a ellas a través de reacciones enzimáticas las transforman, para así asimilarlas o fijarlas en estructuras o sustancias celulares en el interior de la planta (Delgadillo, et al., 2011, pp. 600-601); (Dietz & Schnoor, 2001, p. 165); (Frers, 2008, p. 305); (Ghosh, et al., 2005, pp. 5-6); (Ghori, et al., 2016, p. 390)

**Tabla 1**  
*Clases de fitotecnologías*

	Tipo	Proceso Involucrado	Contaminante
Contención	<b>Fitoextracción o fitoacumulación</b>	Las plantas absorben los contaminantes por medio de las raíces y los acumulan en los tallos y las hojas	Inorgánicos
	<b>Rizofiltración</b>	Las plantas absorben y concentran los contaminantes a través de la raíz.	Orgánicos e inorgánicos
	<b>Fitoestabilización</b>	Las plantas inmovilizan y acumulan los contaminantes en la raíz.	Orgánicos e inorgánicos
	<b>Fitoestimulación</b>	Las plantas producen exudados radiculares, que inactivan los contaminantes y promueve el desarrollo de microorganismos degradativos.	Orgánicos e inorgánicos
Eliminación	<b>Fitovolatilización</b>	Las plantas absorben los contaminantes y los liberan a la atmósfera por medio de la transpiración.	Orgánicos e inorgánicos
	<b>Fitodegradación</b>	Las plantas en asociación con los microorganismos degradan los contaminantes y los transforma en subproductos menos tóxicos o no tóxicos.	Orgánicos

La tabla 1 muestra las clases de fitotecnologías, con sus respectivos procesos y contaminantes. Fuente: elaboración del autor.



**Figura 5.** Fitorremediación. Varela L. (2018) Esquema sobre los mecanismos de remoción según su ubicación en la planta. Recuperado de <https://www.emaze.com/@ATCRTIC>

### ***2.2.3.2. Fitoextracción o fitoacumulación en la Lemna minor.***

La fitoextracción se refiere al proceso mediante el cual la planta absorbe y transporta los agentes contaminantes disueltos en el agua por medio de un sistema radicular y vascular bien desarrollado (Watt & Evans, 1999, p. 320), es decir, la planta absorbe por ósmosis (Harvey, et al., 2002, p. 31), intercambio iónico, complejación superficial y precipitación (Favas, Pratas, & Prasad, 2012, p. 392) los contaminantes que en el caso de esta investigación son los metales pesados (cromo, hierro, manganeso y zinc) atraviesan las membranas celulares presentes en las raíces (Rizodermis) (Huang, Chen, Berti, & Cunningham, 1997, p. 802) de la lenteja de agua dependiendo de diversos factores como son: el peso molecular e hidrofobicidad (del contaminante), la temperatura y el pH (del medio), y son transportados por un sistema vascular conformado por el (xilema y floema) al tejido aerenquimático que se encuentra en el talo de la macrófita. Las macrófitas tienen diferentes rangos de tolerancia a la absorción de metales pesados, para evitar un efecto nocivo a nivel de metabolismo celular, ellas establecen estrategias de translocación a través de los tonoplastos y de acumulación en las vacuolas” (Maiti, Hernandez, González, & López, 2004, p. 2)

A medida que en el tejido aerenquimático se vaya saturando con los contaminantes, se comienzan a notar los primeros efectos negativos en la raíz y posteriormente en toda la planta. En las hojas se afectan las mitocondrias y cloroplastos alterando los procesos de respiración y de fotosíntesis respectivamente; provocando afectaciones a nivel metabólico y de regulación celular, ocasionando la muerte de la planta por acumulación crónica de los metales pesados” (Posada & Arroyave, 2006, p. 60); (Castrillón & Navarro, 2016, p. 71), posteriormente la planta se cosecha y se dispone para su uso final (Ghori, et al., 2016, p. 400); (Nedelkoska & Doran, 2000, p. 551); (Harvey, et al., 2002, p. 32); (Eapen, Suseelan

, Tivarekar, Kotwal , & Mitra , 2003, p. 129); (Cherian & Oliveira, 2006, p. 9381); (López, Gallegos, Pérez, & Gutiérrez, 2005, p. 93); (Flórez & Cotes, 2006, p. 92); (Delgadillo, et al., 2011, p. 602); (Aldana, 2014, p. 11)

#### **2.2.4. Técnicas de medición.**

##### *2.2.4.1. Espectrofotometría de Absorción atómica (EAA).*

La espectroscopia de absorción atómica es una técnica instrumental de análisis químico que permite cuantificar, con un alto nivel de precisión, selectividad y confiabilidad, la concentración (inicial y final) de una gran cantidad de elementos químicos (alrededor de 70) o muestras traza de cualquier agente y/o contaminante que se pueda encontrar en cualquier matriz (sólida y/o líquida).

Para analizar los componentes de las muestras es necesario atomizarlas, normalmente se utiliza una llama y como combustible una mezcla de aire/acetileno, pero también se pueden usar complementos como un horno de grafito, un generador de hidruros o plasmas de acoplamiento inductivo (Skoog, Holler, & Nieman, 2000, pp. 219-239); (Rocha, 2000, pp. 123-203)

Actualmente, esta técnica instrumental se utiliza para el análisis de: aguas, suelos, muestras biológicas, elementos metálicos, compuestos orgánicos, aleaciones, petróleo y sus derivados, además de una extensa gama de muestras analíticas provenientes de las industrias farmacéuticas y químicas (Razmilic, 2016); (Vinasco, 2011, p. 35)

La espectroscopia de absorción atómica (EAA): es la técnica instrumental seleccionada para determinar la carga contaminante (inicial y final) de los metales pesados que son objeto de estudio en esta investigación (cromo, hierro, manganeso y zinc).



**Figura 6.** Esquema de la espectrofotometría de absorción atómica. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/field/003/ab482s/AB482S04.htm>

La EAA es un método utilizado desde 1955, aunque fue descubierto en 1840 por Kirchhoff y Bunsen quienes sustentaban en sus postulados académicos que: *“cualquier materia que pueda emitir luz a una cierta longitud de onda también absorberá luz a esa longitud de onda”*. El átomo está conformado por un núcleo (protones y neutrones) y por una cantidad de electrones que giran alrededor de él y que se encuentran distribuidos en unos niveles de energía (niveles cuánticos). La configuración electrónica (distribución de los electrones en los niveles cuánticos) más estable de un átomo es la que se conoce como “estado fundamental” (Razmilic, 2016) y es la que corresponde al de menor desgaste energético.

Razmilic sustenta que *“si un átomo que se encuentra en su: estado fundamental absorbe cierta cantidad de energía, los electrones saltan de un nivel cuántico inferior a un nivel cuántico superior y el átomo pasa a: un estado excitado; como este estado es temporal e inestable el átomo tiende a regresar a su configuración electrónica más estable, emitiendo una radiación de una determinada frecuencia. La frecuencia del espectro de emisión corresponde a la diferencia energética entre el estado excitado (E1) y el estado fundamental (E0), dicha relación ha sido descrita en la ecuación de Planck”*:

$$E = E_1 - E_0 = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$h$  = constante de Planck       $\nu$  = frecuencia

$c$  = velocidad de luz       $\lambda$  = longitud de onda

#### 2.2.4.2. Componentes de un espectrofotómetro de absorción atómica.

Según el documento; principios básicos de espectroscopía (Rocha, 2000, pp. 123-203), los componentes básicos de un espectrofotómetro de absorción atómica son:

1. Una fuente de radiación que emita una línea específica correspondiente a la necesaria para efectuar una transición en los átomos del elemento analizado.
2. Un nebulizador, que por aspiración de la muestra líquida, forme pequeñas gotas para una atomización más eficiente.
3. Un Quemador, en el cual por efecto de la temperatura alcanzada en la combustión y por la reacción de combustión misma, se favorezca la formación de átomos a partir de los componentes en solución.
4. Un sistema óptico que separe la radiación de longitud de onda de interés, de todas las demás radiaciones que entran a dicho sistema.
5. Un detector o transductor, que sea capaz de transformar, en relación proporcional, las señales de intensidad de radiación electromagnética, en señales eléctricas o de intensidad de corriente.
6. Un amplificador o sistema electrónico, que como su nombre lo indica amplifica la señal eléctrica producida, para que en el siguiente paso pueda ser procesada con circuitos y sistemas electrónicos comunes.
7. Lámparas elementales de 37 mm de diámetro con especificaciones particulares para cada elemento u objeto de análisis según sea el estudio.

8. Por último, se requiere de un sistema de lectura en el cual la señal de intensidad de corriente, sea convertida a una señal que el operario pueda interpretar (ejemplo: transmitancia o absorbancia). Este sistema de lectura, puede ser una escala de aguja, una escala de dígitos, un graficador, una serie de datos que pueden ser procesados a su vez por una computadora.



**Figura 7.** Espectrofotómetro ICE 3000 AA acoplado con horno de grafito GFS33. Anónimo (2018). Recuperado de: <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/CMD/Specification-Sheets/PS-43129-AAS-Combined-Flame-Graphite-Furnace-PS43129-EN.pdf>

#### *2.2.4.3. Tipos de Lámparas usadas en el espectrofotómetro de absorción atómica.*

A continuación, se hace exposición de los tres tipos de lámparas que son usadas en el proceso de espectroscopia de absorción atómica.

##### *2.2.4.3.1 Lámparas de cátodo hueco.*

Es la lámpara más utilizada en el espectrofotómetro de absorción atómica, en el interior de esta lámpara existe un cátodo cilíndrico del metal que contiene al metal en excitación y un ánodo. Cuando se aplica un alto voltaje a la lámpara los átomos del metal presentes en el cátodo se excitan y emiten una luz con una determinada longitud de onda. Estas lámparas son específicas para cada metal, es decir, que para analizar la concentración de hierro en una muestra se debe utilizar tubo catódico de hierro, y así para cualquier otro

metal que se requiera analizar ( (Skoog, Holler, & Nieman, 2000, pp. 219-239); (Rocha, 2000, pp. 123-203)

Estas lámparas generalmente tienen una medida de 37 mm de diámetro, frente a especificaciones de cada elemento dentro de los límites de detección.

#### *2.2.4.3.2. Lámparas multielementos.*

Son lámparas catódicas conformadas por aleaciones de varios elementos y se utilizan cuando existe la certeza de que no hay interferencias espectrales entre los elementos a analizar. Es por ello que esta lámpara se puede utilizar para determinar desde uno hasta 6 elementos metálicos. En la relación costo-beneficio las lámparas multielementos son de bajo costo, en comparación al costo individual de las lámparas individuales, además el mayor inconveniente se debe a que el haz de radiación producido por la lámpara multielementos no tiene la intensidad ni la pureza espectral que proporciona una lámpara individual (Skoog, Holler, & Nieman, 2000, pp. 219-239); (Rocha, 2000, pp. 123-203)

#### *2.2.4.3.3. Lámpara de descarga sin electrodos.*

La lámpara de descarga sin electrodos tiene la misma finalidad que las lámparas de cátodo hueco, se diferencia en la forma en que se excitan los átomos de los elementos, estas lámparas están constituidas por una pequeña cantidad del elemento metálico (generalmente con una sal de yoduro), o el elemento metálico en un recipiente de cuarzo al cual se sometió a un vacío antes de sellarse; después se coloca dentro de un cilindro de cerámica el cual está unido a un generador de radiofrecuencia. Cuando la lámpara es encendida se forma un campo de microondas el cual provoca la volatilización y excitación de los átomos depositados en el recipiente de cuarzo de la lámpara y de esta forma se produce la radiación del elemento a determinar, permitiéndonos conocer la concentración del elemento analizado (Skoog, Holler, & Nieman, 2000, pp. 219-239); (Rocha, 2000, pp. 123-203)

### **2.3 Química del Agua y su Importancia**

El agua posee una estructura molecular simple, está compuesta por un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrógeno; cada átomo de hidrógeno está unido al átomo de oxígeno por medio de un par de electrones de enlace. Como ya se sabe el oxígeno tiene dos pares de electrones no enlazantes de esta manera hay cuatro pares de electrones rodeando al átomo de oxígeno.

El agua es una molécula “polar” lo que significa que tiene una distribución irregular de la densidad electrónica. Como es bien sabido el agua es la sustancia más abundante en la Tierra y en la atmósfera se encuentra en estado sólido, líquido y gaseoso, la mayor reserva de agua está en los océanos, los cuales tienen el 97% del agua que existe en la Tierra. El agua es un recurso finito que según el centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias de ambiente (Prieto, González, Román, & Prieto, 2009, p. 30) tiene la virtud de reciclarse permanentemente mediante el ciclo hidrológico. Este singular hecho ha llegado a suponer que es bien público de libre disponibilidad, pero los hechos muestran otra cosa: hay escasez de agua, por lo cual se hace imperativa la necesidad de tratar las aguas contaminadas.

### **2.4 Contaminación**

Se denomina contaminación al problema ambiental que se ha acentuado en los últimos años en los grandes conglomerados (Kabata Pendias & Pendias, 2001, p. 370), producto de las actividades antrópicas la producción y dispersión de una enorme cantidad de contaminantes en la atmósfera, unido a la topografía y a las condiciones climáticas conducen a niveles mayores de contaminación y alteración ambiental (Kabata Pendias & Pendias, 2001, p. 370); (Roy, et al., 2005, p. 280)

Comúnmente la contaminación es la inserción de sustancias u otros elementos físicos en un medio que hace que este sea inseguro o inadecuado para su uso (Roy, et al., 2005, p. 282)

El contaminante puede ser una sustancia química, energía (radioactividad, luz, calor o sonido), los cuales generan enfermedades y daños a los ecosistemas y al medio ambiente.

#### **2.4.1 Aguas residuales.**

Las aguas residuales son las corrientes de agua que ya han tenido uso alguno o han sido utilizadas en algún proceso de producción, que contienen grandes cantidades de contaminantes (compuestos orgánicos e inorgánicos). Su descarga directa en los cuerpos receptores de agua altera y modifica la calidad de esta, es indispensable el tratamiento previo (Kabata Pendias & Pendias, 2001, p. 371); (Roy, et al., 2005, p. 283)

Existen tres tipos de aguas residuales las cuales son clasificadas de acuerdo al origen del cual provienen y de acuerdo a la función para la cual fueron empleadas. Las aguas residuales se clasifican en domésticas, industriales y agrícolas. Las aguas residuales domésticas provienen de las necesidades diarias de la comunidad, incluyendo las aguas sanitarias, mientras que las industriales incluyen el agua que ha sido utilizada para procesos de producción, lavado y aguas sanitarias de la planta de producción a diferencia de las aguas residuales agrícolas que provienen de la escorrentía superficial de las zonas agrícolas (Pablos , González, Romero, & Ponce, 2011, p. 20)

Los vertimientos industriales tienen grandes diferencias en cuanto a sus propiedades físicas y de sus constituyentes químicos y biológicos dependiendo de las materias primas empleadas. La mayoría de los residuos se descargan en alcantarillas públicas para su tratamiento en las plantas locales de aguas negras. Algunas veces la descarga se hace en un

río, canal, estuario o en el mar lo que significa la contaminación de los cuerpos hídricos receptores (Carranza, 2001, pp. 7-10)

#### **2.4.2 Tipos de contaminante.**

La contaminación al ambiente se da por la entrada de cualquier material (producto de la actividad humana o de forma natural) que se incorpore al ecosistema y produzca efectos negativos al mismo. Los contaminantes se clasifican en:

##### ***2.4.2.1 Contaminantes orgánicos.***

Incluyen hidrocarburos provenientes de colorantes, derivados del petróleo, disolventes, productos farmacéuticos y plaguicidas. Estos contaminantes no tienen un gran impacto negativo debido a su poca toxicidad, reactividad y acumulación en el ambiente (Cherian & Oliveira, 2006, p. 9380)

##### ***2.4.2.2 Contaminantes inorgánicos.***

Incluye metales pesados, no metales y elementos radioactivos. Algunos son esenciales para la nutrición de las plantas y animales en bajas concentraciones. La alta toxicidad de estos elementos depende de su concentración, gran capacidad para acumularse y su baja degradación (Navarro, Aguilar, & López, 2007, p. 20). Para el caso de esta investigación se hará énfasis especialmente en los metales pesados (cromo, hierro, manganeso y zinc).

#### **2.5. Metales Pesados**

Las actividades humanas son la mayor fuente de contaminación de metales pesados en los cuerpos de agua. Esto constituye en uno de los principales problemas ambientales en la actualidad, debido a su alta toxicidad, que dependen de su movilidad en el medio, especiación química, persistencia y tendencia a la bioacumulación, en los ecosistemas donde alteran la supervivencia, la dinámica poblacional de las especies y la estructura del

ecosistema (Metcalf & Eddy, 1998, pp. 126-135); (Roy, et al., 2005, p. 283); (Posada & Arroyave, 2006, p. 61); (Doménech & Peral, 2008, p. 240); (Arenas, Marcó, & Torres, 2011, pp. 5-6); (Ghori, et al., 2016, p. 390)

Se considera un metal pesado, a aquellos elementos que superan el valor de densidad de  $6000 \text{ Kg/m}^3$ . Debido a que se encuentran en muy bajas concentraciones se les denomina elementos traza y algunos son nutrientes esenciales para plantas y animales, pero en concentraciones superiores a ciertos niveles son tóxicos y letales para los seres vivos (Lucho, Álvarez, Beltrán, Prieto, & Poggi, 2005, p. 315); (Vallejo, et al., 2016, p. 20)

Los metales pesados se encuentran en forma natural sobre la superficie de la Tierra en una concentración menor al 0,1%, formando compuestos inorgánicos, que no se degradan de forma natural debido a que la gran mayoría no tienen funciones biológicas específicas para los seres vivos ( Abollino, Aceto, Malandrino, Mentasti, Sarzanini, & Barberis, 2002, p. 180); (Prieto, González, Román, & Prieto, 2009, p. 33). Los metales pesados se clasifican en dos grupos:

### **2.5.1 Metales con función biológica.**

Son esenciales para mantener un correcto metabolismo en los seres vivos, si la concentración de estos metales pesados supera cierto umbral son considerados tóxicos. Dentro de este grupo se encuentran: Cr, Co, Cu, Se, Sn, Zn, Mn, Mo y V (Garcia, Matamoros, Fontás, & Salvadó, 2015, p. 2330); (Sasmaz, Işıl Arslan, Obek, & Sasmaz, 2015, p. 250); (Adriano, Wenzel, Vangronsveld, & Bolan, 2004, p. 123); (Navarro, Aguilar, & López, 2007, p. 15)

### **2.5.2 Metales sin función biológica.**

La concentración de estos elementos en bajas concentraciones es nociva y alteran las funciones de los seres vivos, debido a la propiedad que tienen de bioacumularse. Dentro de

este grupo se encuentran: Cd, Hg, Pb, As (Nedelkoska & Doran, 2000, p. 559); (Kabata Pendias & Pendias, 2001, p. 367)

### **2.5.3 Química de los metales pesados.**

Es el estudio que se encarga de la descripción de los metales que hacen parte de esta propuesta de investigación, con el fin de conocer su composición, características químicas y comportamiento y la relación con los seres vivos, su aplicación en la industria y la normatividad nacional e internacional que establece los niveles máximos en el agua para el consumo humano y actividades agropecuarias.

### **2.5.4 Cromo (Cr).**

Es el primer elemento del grupo VIB en la tabla periódica; tiene un número atómico de 24, su peso atómico es de 51,99 g/mol, y valencias del 2,3,4,5,6. El cromo puede ser considerado como un micronutriente esencial para algunos animales, o como un agente cancerígeno, dependiendo de la forma química en que este se presente. El cromo tiene muchas aplicaciones a nivel industrial, un ejemplo de ello son las aleaciones, pinturas antiincrustantes, catalizadores, agentes anticorrosivos, fungicidas, conservantes de madera, recubrimientos metálicos y electrogalvanizados (Katz & Salem, 1994, p. 110); (U.S. E.P.A., 1998, p. 29); (Arauzo, Rivera, Valladolid, Noreña , & Cedenilla, 2003, p. 90); (Eaton, Clesceri, Rice, Greenberg , & Franson, 2005, p. 1326)

El cromo se puede acumular en el ambiente, por medio de dos fuentes (natural y antropogénicas) y es transportado a los ecosistemas terrestres y acuáticos por medio de efluentes (líquidos y gaseosos) o sedimentos y es acumulado en los seres vivos por medio de las cadenas tróficas (Arauzo, Rivera, Valladolid, Noreña , & Cedenilla, 2003, p. 91)

Las industrias que generan un alto contenido de este metal en los efluentes son: curtiduría de cueros y acabados metálicos, cuya remoción de los ecosistemas se ha

convertido en un verdadero reto tecnológico (Bryan, 1976, p. 193); (Klerks & Levinton, 1989, pp. 43-46)

Las intoxicaciones por la bioacumulación de cromo se manifiestan en lesiones renales, gastrointestinales, del hígado, del riñón, de la glándula tiroides y la médula ósea, y la velocidad corporal de eliminación es muy lenta (Bryan, 1976, p. 193); (Klerks & Levinton, 1989, pp. 43-46)

La organización de las Naciones Unidas para la alimentación y agricultura recomienda un nivel máximo de cromo para aguas de irrigación de 100 µg/L y para aguas potables un nivel máximo de 50 µg/L (Vinasco, 2011, pp. 19-20). Se han considerado diferentes estudios donde se ha utilizado la planta *Lemna minor* para la remoción de este contaminante demostrando que se bioacumula en el talo de la planta.

### **2.5.5 Hierro (Fe).**

Primer elemento del grupo VIII B en la tabla periódica; tiene un número atómico de 26, peso atómico 55,85 g/mol, y valencias 2,3. El hierro es un oligoelemento fundamental en el desarrollo fisiológico de los seres vivos, ya que está presente en una gran cantidad de proteínas y enzimas, pero en exceso, puede causar cáncer y algunas patologías cardíacas (Valencia, 2006, pp. 7-10); (El-Monsef AhmedEl-Badry & El-Kammarb, 2018, pp. 813-815)

El principal uso del hierro es en la obtención y/o fabricación de aceros estructurales, hierros fundidos y forjados, que se utilizan en gran medida en la industria de la construcción; y en menor medida en la fabricación de tintas, imanes y abrasivos.

El hierro se puede encontrar naturalmente en la corteza terrestre, conformando numerosos minerales, por ejemplo: hematites, magnetita y limonita, entre otros; en las

aguas subterráneas y superficiales se encuentra en suspensión o disuelto (Valencia, 2006, pp. 10-12)

La contaminación de los cuerpos de agua debido a la presencia de diferentes especies químicas del hierro se debe principalmente al proceso de decapado del acero, y en menor medida en las operaciones de niquelado y en los drenajes de las aguas ácidas de mina disuelto (Valencia, 2006, pp. 10-18); (Alegría, Ocampo, Rodríguez, & Forlerer, 2016, p. 146); (El-Monsef AhmedEl-Badry & El-Kammarb, 2018, p. 815)

La bioacumulación de hierro en los seres vivos puede ocasionar conjuntivitis, coroiditis, hemocromatosis y retinitis si entra en contacto y permanece en los tejidos (Valencia, 2006, p. 13); (Tatar & Öberk, 2014, pp. 332-336); (El-Monsef AhmedEl-Badry & El-Kammarb, 2018, p. 816)

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que el valor de referencia para la concentración de hierro en el agua apta para consumo humano es de 0,3 mg/L (O.M.S., 2006, p. 310). Se ha encontrado que la industria global con frecuencia contamina los cuerpos hídricos con este elemento el cual puede ser controlado a través de técnicas alternativas de reparación de las aguas.

#### **2.5.6 Manganeso (Mn).**

Es el primer elemento del grupo VIIB en la tabla periódica; tiene un número atómico de 25, peso atómico 54,93 g/mol, y valencias del 2,3,4,6,7. El manganeso es considerado un oligoelemento ya que es esencial para el metabolismo de los animales y las plantas, pero en grandes cantidades el manganeso puede tener efectos neurotóxicos en los mamíferos que pueden ser irreversibles (W.H.O., 1999, p. 6); (O.M.S., 2006, p. 315); (Valencia, 2006, p. 14)

A pesar de ser el metal más abundante en la naturaleza después del hierro, los minerales de manganeso, desde el punto de vista económico, son muy escasos; los principales son: la pirolusita, el psilomelano y el wad. De estos minerales, tratándose metalúrgicamente con técnicas adecuadas y actualizadas, se pueden obtener productos de gran aceptación en el mercado nacional; siendo el mayor consumidor la industria siderúrgica (técnica para el tratamiento del hierro para ser aleaciones u otros tipos de metales) en la producción de aceros inoxidable, aceros de alta temperatura, hierro colado y súper aleaciones, también se utiliza en la fabricación de pilas, cerámicos, pinturas y decoloración de vidrio (Rodríguez K. , 2005, pp. 10-14); (Aguilar & Aguilar, 2017, pp. 8-9); (Valencia, 2006, p. 11)

La exposición prolongada a una concentración alta de manganeso, produce en los seres vivos alteraciones mentales irreversibles, es decir, daña la parte del cerebro que controla las emociones y la coordinación de los movimientos corporales, esta combinación de síntomas se denomina “manganismo” (A.T.S.D.R., 2000, pp. 2-6)

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que el valor de referencia para la concentración de manganeso en el agua apta para consumo humano es de 0,5 mg/L (O.M.S., 2006, p. 315)

### **2.5.7 Zinc (Zn).**

Primer elemento del grupo IIB en la tabla periódica; tiene un número atómico de 30, peso atómico 65.38 g/mol, y valencia 2. El zinc es un elemento esencial para la nutrición de las plantas, animales e incluso para el ser humano, ya que participa en sus procesos fisiológicos y reproductivos (El-Monsef AhmedEl-Badry & El-Kammarb, 2018, pp. 811-816), pero también pueden causar toxicidad si se excede en su consumo (Casierra & Poveda, 2005, pp. 283-285); (Navarro, Aguilar, & López, 2007, p. 2540)

Las principales fuentes del zinc en los cuerpos acuáticos se deben a los efluentes de aguas residuales, provenientes de la minería, fundición, refinación, combustión de combustibles fósiles, entre otras emisiones atmosféricas. El zinc se puede depositar y acumular en diferentes ecosistemas mediante los ciclos biogeoquímicos (Bocanegra, 1998, p. 34); (Carranza, 2001, p. 30); (Sasmaz, Işıl Arslan, Obek, & Sasmaz, 2015, p. 250)

El exceso en la concentración de zinc en los ecosistemas (acuáticos y terrestres) afecta la calidad de vida en los seres vivos, porque inhibe la actividad enzimática y ciclo celular, interfiere en el metabolismo del fósforo y en la regulación hormonal (Bryan, 1976, p. 193); (Klerks & Levinton, 1989, pp. 43-46); (Sánchez, Reigosa, & Bonjoch, 2004, p. 300)

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que el valor de referencia para la concentración de zinc en el agua apta para consumo humano es de 3 mg/L (O.M.S., 2006, p. 362)

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Enfoque y diseño metodológico

La investigación es un proceso sistemático orientado a estudiar fenómenos. En este caso, se considera conveniente orientar el estudio hacia un enfoque cuantitativo; de naturaleza experimental. Dado a que, el estudio experimental manipula intencionalmente una o más variables independientes, analizando las consecuencias que la manipulación tiene sobre la variable dependiente, todo esto bajo una situación de control (Hernández, Fernández, & Baptista , 2014, p. 99). Así mismo, el diseño experimental se utiliza cuando el investigador busca establecer el posible efecto de una causa que se manipula, de manera que la investigación está centrada en la validez, rigor y el control de la situación planteada, logrando así los objetivos de conocimientos a fin de estimar los efectos causales.

De igual forma la metodología cuantitativa empleada por la investigación busca analizar el comportamiento de una serie de causas y efectos, a partir de datos numéricos encontrados, que permiten verificar y constatar un problema (Hernández, Fernández, & Baptista , 2014, p. 113);ofreciendo así, una posible solución ante el creciente deterioro de los ecosistemas acuáticos del departamento del Huila, a causa del vertido de aguas residuales al agua, contaminándolos y generando exposición por de metales pesados.

De otra parte, el diseño experimental de esta investigación, requiere la manipulación de dos variables o factores experimentales, la variable dependiente remoción de metales pesados en agua contaminada y la variable independiente consistente en el uso de *Lemna minor*, las cuales están orientadas a la identificación del nivel de remoción de metales pesados, con el uso de la macrófita *Lemna minor*; y la recuperación de los ecosistemas acuáticos, por medio de esta técnica limpia. Asimismo, la investigación tiene en cuenta 8

acuarios experimentales y dos acuarios control para la verificación y contraste de los resultados obtenidos los cuales reciben un tratamiento diferente, dado a que permiten llevar un control de la tasa de evaporación.

De esta manera, la investigación experimental constituye en el procedimiento más indicado para investigar las relaciones causa- efecto que se describen en este estudio investigativo (Monje, 2011, p. 105) con la excepción de que actúa de forma diversa, al modificar las condiciones, de ahí la importancia de que sea una observación confiable y controlada.

### 3.2. variables

En la siguiente tabla se muestra las variables identificando la unidad de análisis de trabajo.

**Tabla 2.**  
*Determinación de variables.*

	<b>Tipo de Variable</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicador</b>
<b>Variable</b>	<b>Independiente</b> Estrategia biorremediadora de <i>Lemna minor</i> para la recuperación de ecosistemas acuáticos.	Capacidad de recuperación de ecosistemas acuáticos contaminados	Formulación Diseño experimental Uso de la macrófita <i>Lemna Minor</i> , en agua contaminada de forma <i>in vitro</i> Experimentación
	<b>Dependiente</b> remoción de metales pesados en aguas residuales	Nivel de absorción de sustancias tóxicas de la macrófita <i>Lemna minor</i> .	Refutación y contraste Análisis de los datos obtenidos por espectrofotometría de absorción atómica

En la tabla 2, se muestra las variables o factores experimentales que se tuvo en cuenta en la investigación.  
Fuente: Elaboración del autor.

### 3.3. Espacio Geográfico

Como espacio geográfico seleccionado para esta investigación se escogió el municipio de Palermo, del departamento del Huila; de donde se extrajo un área superficial de 21 m<sup>2</sup> aproximadamente de la macrófita *Lemna minor*, la cual fue seleccionada cuidadosamente del humedal *La Sardinata*. De esta muestra inicial, se escoge 500 g de macrófitas, la cual representa un valor aproximado de 1500 a 2500 plantas en estado de madurez; una vez recogida las muestras se trasladan al laboratorio en recipientes plásticos con agua extraída del humedal, donde posteriormente se cultivan en canecas plásticas de capacidad de 15 L de agua, monitoreando su crecimiento y desarrollo bajo condiciones controladas de laboratorio.

El crecimiento y desarrollo de la planta, se lleva a cabo con factores de desarrollo predeterminados: temperatura  $25 \pm 2$  °C, humedad de 60 % y con fotoperiodos de 12/12h (Pietrini , Bianconi, Massacci, & Lanelli, 2016, p. 80). Cada vez que presentaba un nuevo brote de planta se trasladó a un nuevo recipiente, llegando así, a la tercera generación de la planta, con el fin de trabajar con este nuevo espécimen vegetal y eliminar cualquier plaga y/o contaminante que se pudiera presentar, para lo cual se estimó un periodo de tiempo de tres meses / 90 días, siendo esta la técnica de purificación empleada a fin de trabajar con un espécimen libre de impurezas y plagas.

Una vez, se aisló los especímenes vegetales con los cuales se iba a proceder en el estudio, el ejercicio experimental se realizó en los laboratorios de química del programa de ingeniería ambiental de la Universidad Fundación Escuela Tecnológica (FET), ubicado en el municipio de Rivera, Huila, teniendo en cuenta que se realizo con técnicas de laboratorio *in vitro*.



**Figura 8.** Área superficial de la *Lemna minor*. Imagen fotográfica, tomada para los intereses pertinentes a esta investigación. Donde se observa, en su hábitat natural, humedal *La Sardinata* del municipio de Palermo, Huila.

### **3.4. Población y Muestra**

#### **3.4.1. Población.**

La población hace referencia a los objetos o medidas observables que hacen parte de la investigación, en este caso: los cinco litros de agua destilada que se empleó para elaborar las disoluciones que hacen parte de los diez acuarios (8 experimentales y 2 de control); teniendo en cuenta que la concentración de cada uno de ellos, varía de acuerdo a la serie; la serie 1, posee metales pesados en concentración de 1,0 mg/L; mientras que la serie 2, posee metales en concentración de 2,0 mg/L. Además de 1.134 g de peso en seco de la macrófita *Lemna minor* que se empleó para el proceso biorremediador.

### **3.4.2. Muestra.**

La muestra dispuesta por la investigación hace referencia a 0,5 L que es el volumen de agua el cual se contamina intencionalmente (técnica de laboratorio *in vitro*) para cada acuario, con los 4 metales pesados (Cr, Fe, Mn, Zn) respectivamente. En donde la concentración varía dependiendo de la serie de 1,0 mg/L (serie 1) y 2,0 mg/L (serie 2); una vez establecido esto, se procede al proceso de remoción por medio de la lenteja de agua.

### **3.5. Procedimiento**

El procedimiento de la investigación obedece al plan de trabajo, en donde se detalla las tres (3) fases de análisis, que se van a desarrollar durante el proceso investigativo.

#### **Fases de análisis**

##### **3.5.1. Fase inicial.**

Esta fase constituye el proceso de recolección, traslado y montaje del semillero de la macrófita *Lemna minor* en condiciones controladas de laboratorio.

##### ***Etapa 1: recolección de la Lemna minor.***

Se recoge una muestra de 500g de *Lemna minor* (1500 a 2000 ejemplares) del humedal la Sardinata, del municipio de Palermo- Huila.

##### ***Etapa 2: traslado de la Lemna minor.***

El traslado de la macrófita se lleva a cabo en recipientes de plástico con capacidad de 15 L, a los laboratorios de química seleccionados, adscritos al programa de ingeniería ambiental de la Universidad Fundación Escuela Tecnológica (Rivera, Huila).

***Etapa 3: Adecuación del laboratorio, observación y monitoreo y creación de semilleros.***

1. Para la adecuación del montaje experimental se dispuso de un Termómetro Higrómetro Industrial 1000 °C Minipa Mth-1362 para el control de la temperatura de  $25 \pm 2$  °C y humedad de 60 %. En tanto al control del fotoperiodo de 12/12h, se llevo a cabo a través de una lámpara led de 32w, con el fin de garantizar condiciones optimas de crecimiento para la macrófita.
2. La observación y monitoreo consiste en observar el crecimiento de la muestra recolectada inicialmente de 500 g *Lemna minor*
3. La creación del semillero, se hace con el fin de eliminar cualquier agente extraño presente en las macrófitas, evitando cualquier factor de alteración que entorpezca la confiabilidad de los resultados obtenidos. Para esto se dispone del siguiente procedimiento:
  - Obtención de la primera generación: Superados los primeros 30 días, se presencié un brote (primera generación) de macrófitas juveniles, estas se trasladaron a un nuevo recipiente con las mismas características del primero.
  - Obtención de la segunda generación: Superados los 60 días se observó un nuevo brote (segunda generación) de *Lemna minor* en etapa juvenil, estas plantas producto de este nuevo brote se sembraron en un nuevo recipiente que posee las mismas características que el primero.
  - Obtención de la tercera generación: Finalizados los 90 días de iniciado el proceso de purificación de las plantas se observó un nuevo brote (tercera generación) de *Lemna minor*, es importante aclarar que las macrófitas obtenidas en este último proceso serán las utilizadas para el ejercicio experimental de biorremediación de metales pesados.

### 3.5.2. Fase experimental.

La fase experimental hace referencia a la preparación de disoluciones de los metales pesados objeto de estudio y la siembra de la *Lemna minor* en los acuarios experimentales.

#### ***Etapa 1: preparación de disoluciones de los metales objeto de estudio.***

En esta etapa se prepara las disoluciones requeridas para la elaboración de la curva de calibración de la técnica y del proceso de biorremediación. Para ello se dispone de los siguientes pasos:

##### ***1. Preparación de disoluciones de los metales pesados:***

Se prepararon veinte disoluciones, cinco por cada metal pesado empleado (Cr, Fe, Mn, Zn); de estas cinco disoluciones por metal, tres se usaron para la curva de calibración, siguiendo el protocolo para la determinación de metales pesados con digestión ácida y solubles por lectura directa (IDEAM, 2004, p. 4), y por el método estándar de absorción atómica para el análisis de metales pesados en muestras de aguas y aguas residuales (Gomez, 2011, pp. 20-34). Las dos restantes se utilizaron para el proceso de biorremediación. De igual forma hay que resaltar que las disoluciones anteriormente mencionadas se prepararon a partir de patrones analíticos de concentración de 1000 mg/L de cromo, hierro, manganeso y zinc (*marca Panreac*). En este sentido, es de resaltar que todas las disoluciones se prepararon utilizando el siguiente algoritmo  $C_1 * V_1 = C_2 * V_2$  y con agua acidulada a partir de ácido nítrico al 5% v/v.

##### ***2. Preparación de los estándares para la curva de calibración.***

A partir de la disolución patrón de 1000 mg/L se prepararon por separado, 100 mL de cuatro disoluciones estándar con concentración intermedia 100 mg/L de Cr, Fe, Mn y Zn en agua desionizada.

*Estándares de calibración.*

A partir de las cuatro disoluciones estándar preparadas anteriormente, se obtienen las disoluciones de concentración baja, media y alta, tal como se describe a continuación:

- **Cromo:** Tres disoluciones de 100 mL con una concentración de: 1,0 mg/L, 2,0 mg/L y 4,0 mg/L respectivamente (IDEAM, 2004, p. 11)
- **Hierro:** Tres disoluciones de 100 mL con una concentración de: 0,2 mg/L, 1,0 mg/L y 3,0 mg/L respectivamente (Gomez, 2011, p. 21)
- **Manganeso:** Tres disoluciones de 100 mL con una concentración de: 0,2 mg/L, 1,0 mg/L y 2,0 mg/L respectivamente (Gomez, 2011, p. 29)
- **Zinc:** Tres disoluciones de 100 mL con una concentración de: 0,25 mg/L, 0,5 mg/L y 1,0 mg/L respectivamente (IDEAM, 2004, p. 13)

*Estándares para la curva de calibración de Cromo Total y Cromo Soluble de 1,0; 2,0 y 4,0 mg/L.*

A partir de la solución patrón de 1000 mg/L de cromo se preparó con agua acidulada 100 mL de disolución estándar a 10,0 mg/L de este metal.

Por igual, utilizando el estándar de 10,0 mg/L preparado anteriormente, se prepararon tres estándares de 100 mL a concentraciones 1,0; 2,0 y 4,0 mg/L respectivamente.

*Estándares para la curva de calibración de Hierro Total y Hierro Soluble de 0,2, 1,0 y 3,0 mg/L.*

A partir de la solución patrón de 1000 mg/L de cromo se preparó con agua acidulada 100 mL de disolución estándar a 10,0 mg/L de este metal.

Por igual, utilizando el estándar de 10,0 mg/L preparado anteriormente, se

prepararon tres estándares de 100 mL a concentraciones 0,2, 1,0 y 3,0 mg/L respectivamente.

*Estándares para la curva de calibración de Manganeso Total y Manganeso Soluble de 0,2, 1,0 y 2,0 mg/L.*

A partir de la solución patrón de 1000 mg/L de cromo se preparó con agua acidulada 100 mL de disolución estándar a 10,0 mg/L de este metal.

Por igual, utilizando el estándar de 10,0 mg/L preparado anteriormente, se prepararon tres estándares de 100 mL a concentraciones 0,2, 1,0 y 2,0 mg/L respectivamente.

*Estándares para la curva de calibración de Zinc Total y Zinc Soluble de 0,25, 0,5 y 1,0 mg/L.*

A partir de la solución patrón de 1000 mg/L de cromo se preparó con agua acidulada 100 mL de disolución estándar a 10,0 mg/L de este metal.

Por igual, utilizando el estándar de 10,0 mg/L preparado anteriormente, se prepararon tres estándares de 100 mL a concentraciones 0,25, 0,5 y 1,0 mg/L respectivamente.

*3. Preparación de soluciones para proceso de biorremediación con destino a contaminar artificialmente los acuarios son:*

En esta fase se prepararon ocho disoluciones de 500 mL con agua acidulada. Cada una de esas soluciones contienen los metales pesados objetos de estudio, con una concentración de 1,0 mg/L (serie 1) y 2,0 mg/L (serie 2). Dichas soluciones se utilizaron en el proceso de biorremediación por acción de la macrófita *Lemna minor*.

Las soluciones que se prepararon para el proceso de biorremediación con destino a contaminar artificialmente los acuarios son:

- **Cromo:** Dos soluciones de 500 mL con una concentración de: 1,0 mg/L y 2,0 mg/L respectivamente.
- **Hierro:** Dos soluciones de 500 mL con una concentración de: 1,0 mg/L y 2,0 mg/L respectivamente.
- **Manganeso:** Dos soluciones de 500 mL con una concentración de: 1,0 mg/L y 2,0 mg/L respectivamente.
- **Zinc:** Dos soluciones de 500 mL con una concentración de: 1,0 mg/L y 2,0 mg/L respectivamente.

*Preparación de 500 mL de disoluciones de concentración 1,0 mg/L de cromo, Hierro, Manganeso y Zinc respectivamente.*

A partir de la solución patrón de 1000 mg/L se prepararon con agua acidulada 100 mL de disolución estándar a 10,0 mg/L de cada metal.

Por igual, utilizando el estándar de 10,0 mg/L preparado anteriormente, se prepararon 500 mL de estándar a un 1,0 mg/L para cada uno de los metales.

*Preparación de 500 mL de disoluciones de concentración 2,0 mg/L de cromo, Hierro, Manganeso y Zinc respectivamente.*

A partir de la solución patrón de 1000 mg/L se prepararon con agua acidulada 200 mL de disolución estándar a 10,0 mg/L de cada metal.

Por igual, utilizando el estándar de 10,0mg/L preparado anteriormente, se prepararon 500 mL de estándar a un 2,0 mg/L para cada uno de los metales.

#### *4. Preparación de estándares de control de digestión*

A partir de la solución patrón de 1000 mg/L de cromo, hierro, manganeso y zinc se prepararon 100 mL de disolución estándar a 10,0 mg/L de cada metal. Por igual, utilizando el estándar intermedio de 10,0 mg/L preparado anteriormente, se prepararon 100 mL (con agua desionizada), de estándar de control a un 1,0 mg/L para cada uno de los metales.

#### *5. Limpieza del material de vidrio*

Se procedió a desarrollar un proceso de limpieza (higienización) de la totalidad del material de laboratorio usado, incluyendo las botellas de muestreo, empleadas para la determinación de metales pesados, para lo cual se desarrolló un proceso de lavado siguiendo las instrucciones del “*Procedimiento para Lavado de Material*” concebido en el protocolo del (IDEAM, 2004, p. 10), que consiste en lavar con jabón neutro para posteriormente sumergir en HNO<sub>3</sub> diluido al 10% v/v.

#### ***Etapas 2: Siembra de la Lemna minor en los acuarios experimentales.***

En esta etapa se determinó las cantidades de *Lemna minor* a ser sembradas y/o instaladas en los ocho acuarios experimentales, para ello se dispone de los siguientes pasos:

##### ***1. Calcular el peso en seco de la Lemna minor para siembra en los acuarios***

La densidad de siembra de la *Lemna minor* que se utilizó en el montaje experimental es de 4 Kg.m<sup>-2</sup> (Reyes, et al., 2011, p. 1)

Se sembraron 126 g de peso en seco de *Lemna minor* obtenida de la tercera generación, en cada uno de los ocho acuarios experimentales de polipropileno que presentan las siguientes dimensiones 15 cm (longitud) x 21 cm (ancho) x 10 cm (altura), cuya capacidad es de 3.150 L. El agua destilada que se utilizó para el llenado de los acuarios hace referencia a las soluciones anteriormente preparadas y descritas en el ítem

“Preparación de soluciones para proceso de biorremediación con destino a contaminar artificialmente los acuarios” p.65.

## ***2. Instalación de la Lemna minor en los ocho acuarios experimentales.***

Los ocho acuarios contenedores de los 1134 g de peso en seco de la *Lemna minor* fueron divididos en dos series de cuatro acuarios, (cada acuario con 126 g de peso en seco de la macrófita) la primera serie contuvo la solución de los metales pesados de concentración 1,0 mg/L y la segunda serie contuvo la solución de los metales pesados de concentración 2,0 mg/L.

Adicionalmente a los ocho acuarios experimentales (*Lemna minor* + solución con metales pesados) se elaboró un montaje de dos acuarios adicionales de polipropileno que sirvieron como instrumentos de control: el primero con 126 g de peso en seco de la *Lemna minor* en 500 mL de agua, y el segundo acuario de control con la mezcla de las ocho soluciones de los cuatro metales pesados con un volumen final de 500 mL, que corresponde 62,5 mL de cada disolución. En la tabla 3, se describe los elementos que hacen parte de cada uno de los acuarios, con las concentraciones del metal empleado en cada experiencia.

De igual forma, es de resaltar que el acuario A9, permite identificar de forma eficiente el porcentaje de evaporación durante el proceso experimental, junto al acuario 10 de control, el cual posee la mezcla de todos los metales pesados con las siguientes concentraciones: Cr (2,44 mg/L); Fe (2,84 mg/L); Mn (2,54 mg/L) y Zn (2,46 mg/L). Todo esto con el fin de determinar el nivel de evaporación durante el proceso fitorremediador y corroborar que en la planta como en las soluciones de metales pesados no se encuentran agentes contaminantes extraños que puedan interferir y/o alterar los resultados obtenidos.

**Tabla 3**

*Caracterización del contenido de acuarios con sus respectivas concentraciones.*

Series	Acuarios	Cantidad de <i>Lemna minor</i> (g)	Metal	Concentración (mg/L)
1	A1	126	Cr	1
2	A5	126		2
1	A2	126	Fe	1
2	A6	126		2
1	A3	126	Mn	1
2	A7	126		2
1	A4	126	Zn	1
2	A8	126		2
Control 1	A9	126	N/A	N/A
Control 2	A10	N/A	Cr	2,44
			Fe	2,84
			Mn	2,54
			Zn	2,46

En la tabla 3, se describen la cantidad de la macrófita *Lemna minor* que se emplea en cada uno de los acuarios y las concentraciones de cada uno de los metales empleados en la experiencia investigativa.

### ***3. Biorremediación (bioacumulación) en condiciones controladas de laboratorio***

Una vez terminado la instalación de los ocho acuarios experimentales y los dos acuarios de control, se inició el proceso de fitorremediación con la macrófita *Lemna minor*, el cual tuvo una duración de 168 horas (siete días), durante este periodo de tiempo se llevó a cabo el control de la temperatura en  $25 \pm 2$  °C y la humedad en 60 % con el equipo Termómetro Higrómetro Industrial 1000 °C Minipa Mth-1362 y los fotoperiodos de 12/12 h con una lámpara led de 32w (Pietrini , Bianconi, Massacci, & Lanelli, 2016, p. 80). Debido a la evaporación y a los procesos metabólicos de la planta, el nivel del agua disminuyó, por

tal motivo se llevó un control de la cantidad de agua consumida y/o evaporada en los ocho acuarios experimentales y en los dos acuarios de control.

Al término del séptimo día, al agua presente en los ocho acuarios experimentales y en los dos acuarios de control, se les realizó un proceso de filtrado, utilizando un filtro de acetato de celulosa de diámetro de poro 0,45  $\mu\text{m}$  con el fin de retirar el material vegetal presente u otro elemento extraño que pudiera interferir con los resultados obtenidos; posteriormente se adiciono ácido nítrico hasta que las muestras alcanzaran un  $\text{pH} < 2$ , dichas muestras se depositaron en viales (previamente purgados con  $\text{HNO}_3$  al 10%) de color ámbar (para evitar la reacción de los metales con la luz solar) y con capacidad de 50 mL. Dicho proceso se realizó con el fin de preservar las muestras por un tiempo máximo de 6 meses según lo estipulan los *Instructivos de Muestreo de Agua Residual*, el *Instructivo de Muestreo de Agua Superficial Contaminada* y el *Instructivo Muestras Análisis Fisicoquímicos Aguas Superficiales* publicadas por el IDEAM.

### **3.5.3. Fase final.**

La fase final hace referencia al procedimiento de análisis y procesamiento de datos y cálculos de resultados; de igual forma se determinan los porcentajes de remoción de los metales pesados, mediante proceso de biorremediación de *Lemna minor*, a través de los datos obtenidos en la espectrofotometría de absorción atómica.

#### ***Etapa 1. Procedimiento de análisis y procesamiento de datos y cálculo de resultados.***

En esta etapa se realizó el análisis por espectroscopia de absorción atómica mediante el espectrofotómetro Thermo Scientific de referencia ICE 3000 Series AA acoplado a un horno de grafito de referencia GFS33, el cual se encuentra en el laboratorio agroambiental de suelos y aguas LAGSA; y por medio de los cuales, se determinaron los porcentajes de

remoción para cada uno de los metales pesados.

***Etapa 2. Análisis de las 10 muestras de agua provenientes de los ocho acuarios experimentales y de los dos acuarios de control por medio de la espectrofotometría de absorción atómica.***

Se analizaron las diez muestras de agua provenientes de los ocho acuarios experimentales y de los dos acuarios de control, por medio de un espectrofotómetro de absorción atómica Thermo Scientific de referencia ICE 3000 Series AA acoplado a un horno de grafito de referencia GFS33.

Antes de realizar el análisis por EAA, a las muestras de agua se les realizó un proceso de digestión ácida desarrollado con ácido nítrico y peróxido de hidrógeno, con el fin de oxidar los metales, reduciendo así las posibles interferencias causadas por la materia orgánica, todo ello, teniendo en cuenta las recomendaciones del IDEAM para la determinación de metales pesados totales con digestión ácida y solubles, lectura directa por espectroscopia de absorción atómica publicado en el año 2004.

***Etapa 3. Especificaciones del tipo de lámpara a utilizar.***

A continuación, se presenta la tabla No. 4. Metales pesados con Digestión, en la que se muestra las especificaciones del tipo de lámpara a emplear en el estudio investigativo, describiendo la longitud de onda, límite de detección, límite de cuantificación, tipo de flama y los estándares de calibración para cada uno de los metales objetos de estudio.

Teniendo en cuenta que el tipo de lámpara empleado hace referencia a lámpara elemental de cátodo hueco, el cual es uno de los más utilizados por EAA, dado a su alto poder de especificidad (ver *lámparas de cátodo hueco*. p. 47)

**Tabla 4.**  
*Metales pesados con Digestión.*

<b>Metal</b>	<b>Tipo de lámpara</b>	<b><math>\lambda</math> nm</b>	<b>Límite de detección mg/L</b>	<b>Límite de cuantificación mg/L</b>	<b>Tipo de flama</b>	<b>Estándares de calibración mg/L</b>
<b>Cromo</b>	Lámpara elemental de Cr 37 mm de diámetro	357,9	0,06	0,2		1,0; 2,0 y 4,0
<b>Hierro</b>	Lámpara elemental de Fe 37 mm de diámetro	324,8	0,0043	0,052		0,2; 1,0 y 3,0
<b>Manganeso</b>	Lámpara elemental de Mn 37 mm de diámetro	279,5	0,0016	0,020	aire/ace tileno (8.5 a 9 PSI:20 a 30 PSI)	0,2; 1,0 y 2,0
<b>Zinc</b>	Lámpara elemental de zinc 37 mm de diámetro	213,9	0,0033	0,001	)	0,25; 0,5 y 1,0

En la tabla 4, se muestra el tipo de lámpara empleada para cada metal pesado, con la respectiva longitud de onda y otras especificaciones.

***Etapa 4. Determinación de los porcentajes de remoción de los metales pesados.***

La determinación de los porcentajes de remoción de los metales pesados, se llevó a cabo mediante el proceso de biorremediación de la *Lemna minor*, obteniendo los datos descritos por la técnica de espectrofotometría de absorción atómica.

En esta etapa se analizaron los datos obtenidos por el espectrofotómetro, posteriormente se determinaron los porcentajes de remoción mediante la siguiente ecuación:

$$\%R = \frac{S_o - S}{S_o} \times 100$$

Dónde:

%R: Porcentaje de remoción

So: Carga contaminante inicial (del agua contaminada artificialmente durante el proceso en el laboratorio) (mg/L)

S: Carga contaminante final (del agua después del proceso de fitorremediación) (mg/L)

Esta ecuación es conocida con el nombre de ecuación de carga contaminante.

(Katz & Salem, 1994, p. 80); (Kabata Pendias & Pendias, 2001, p. 386); (Khellaf & Zerdaoui, 2009, p. 164); (Hassan & Aarts, 2011, p. 57); (Khataee, Movafeghi, Torbati, Salehi, & Zarei, 2012, p. 297); (Garcia, Matamoros, Fontás, & Salvadó, 2015, p. 2332); (Kösesakal, Ünal, Memon, & Yuksel, 2016, p. 472)

#### ***Etapa 5. Análisis estadístico.***

A través del software *GraphPad Prism 6* se desarrolló un proceso de análisis y seguimiento estadístico ANOVA a los resultados obtenidos, detallados a través de tablas que proporcionan y validan de manera organizada y sistemática la información suministrada, los cuales se encuentran presentes en el acápite de anexos de la presente investigación.

Asimismo, los resultados de esta investigación se encuentran descritos en el capítulo de hallazgos.

#### 4. HALLAZGOS

A continuación, se presentan los hallazgos obtenidos durante el proceso de bioacumulación de los metales pesados tales como: cromo, hierro, manganeso y zinc, los cuales se encontraban disueltos en los ocho acuarios experimentales. Este tratamiento se realizó por medio de la macrófita *Lemna minor*, el periodo de tratamiento duró siete días, con control de temperatura en  $25 \pm 2$  °C, la humedad en 60 %, los fotoperiodos de 12/12 h y registro de la tasa de evaporación (Pietrini , Bianconi, Massacci, & Lanelli, 2016, p. 80), sumado a esto, es de resaltar que las diez muestras de agua recolectadas de los diez acuarios experimentales se les realizó un proceso de filtrado y de digestión ácida como se estipulo en la metodología.

El análisis de las muestras se hizo por duplicado a través de un espectrofotómetro de absorción atómica Thermo Scientific de referencia ICE 3000 Series AA acoplado a un horno de grafito de referencia GFS33, que se encuentra en laboratorio LAGSA y un análisis estadístico ANOVA a través del *software GraphPad Prism 6*.

##### 4.1. Remoción de Cromo

En el proceso de biorremediación de cromo por medio de la macrófita *Lemna minor*, los resultados reportados por el laboratorio LAGSA (*ver anexo 1*, p. 105), se consignan en la tabla 5. Donde es de resaltar que el laboratorio reporta los resultados promedios del análisis por duplicado que realizó. Para determinar la pertinencia de dichos resultados, se les realiza un análisis estadístico unidireccional ANOVA por medio del *software GraphPad Prism 6*, el cuál esta dispuesto en la tabla 6.

**Tabla 5***Resultados biorremediación de Cromo, analizados por EAA*

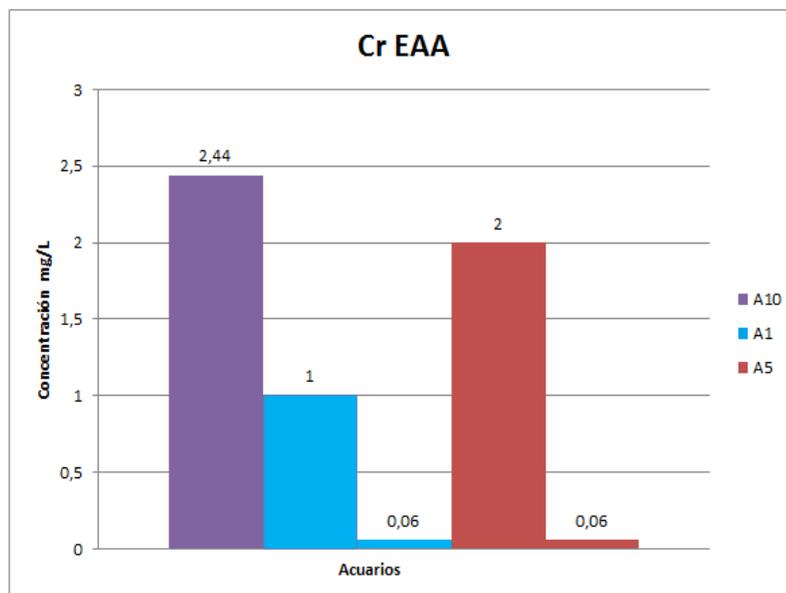
Acuarios	Cantidad de <i>Lemna minor</i> (g)	Volumen Inicial (mL)	Volumen Final (mL)	Tasa de evaporación (%)	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	Remoción (%)
A1	126	500	195	61	1	0,06	94
A5	126	500	210	58	2	0,06	97
A9	126	500	219	56,2	---	---	---
A10	---	500	226	54,8	2,44	2,44	---

En la tabla 5, se muestra los resultados obtenidos del proceso de biorremediación del cromo, por espectrofotometría de absorción atómica.

**Tabla 6***Análisis estadístico ordinario unidireccional ANOVA para Cr por EAA*

N.	Control	1 mg/L	2 mg/L
Number of values	2	2	2
Minimum	2.410	0.0600	0.0600
25% Percentile	2.410	0.0600	0.0600
Median	2.445	0.0780	0.0690
75% Percentile	2.480	0.0960	0.0780
Maximum	2.480	0.0960	0.0780
Mean	2.445	0.0780	0.0690
Std. Deviation	0.04950	0.02546	0.01273
Std. Error of Mean	0.03500	0.0180	0.009000
Lower 95% CI	2.000	-0.1507	-0.04536
Upper 95% CI	2.890	0.3067	0.1834

En la tabla 6, se dispone de la tabla estadística descriptiva del análisis ordinario unidireccional ANOVA para Cr por espectrofotometría de absorción atómica



**Gráfica 1.** Resultados biorremediación de Cromo. Analizado por espectrofotometría de absorción atómica. Fuente: elaboración del autor.

En lo que concierne al proceso *in vitro* de remoción de cromo, se utilizaron dos acuarios de polipropileno (A1 y A5), cada uno conteniendo una solución de 500 mL de cromo a 1,0 mg/L y 2,0 mg/L respectivamente; posteriormente se sembraron los 126 g de peso en seco de *Lemna minor* y se realizó el proceso de biorremediación durante un periodo de siete días (168 h), controlando la temperatura en  $25 \pm 2$  °C, la humedad en 60 % y los fotoperiodos de 12/12 h (Pietrini *et al.*, 2016, p.80), simultáneamente se hizo el proceso de registro de disminución del nivel de agua en los acuarios generado por los procesos de evaporación y/o a metabólicos de la planta.

Culminado el séptimo día se retiraron las plantas de los acuarios, posteriormente a las muestras de agua proveniente de los acuarios (A1, A5, A9 y A10) se le realizó un proceso de filtrado y de digestión ácida con los propósitos de: eliminar cualquier rastro de material orgánico, oxidar los metales presentes con el fin de eliminar interferencias que pudieran alterar los resultados obtenidos y de conservar la muestra para su posterior análisis; dichas muestras se depositaron en viales de color ámbar (previamente purgados con HNO<sub>3</sub> al 10%

v/v) con capacidad de 10 mL (para evitar la reacción de los metales con la luz solar), finalmente se realizaron por duplicado los análisis de las muestras recolectadas en los recipientes A1, A5, A9 y A10 (acuarios experimentales y de control respectivamente) a través del espectrofotómetro de absorción atómica Thermo Scientific de referencia ICE 3000 Series AA acoplado a un horno de grafito de referencia GFS33, con los resultados obtenidos por la técnica analítica se obtuvieron los porcentajes de remoción utilizando la fórmula de carga de contaminante, por lo cual se determinó que en el primer acuario (A1) hubo una disminución en la concentración de cromo por parte de la *Lemna minor* debido a que pasó de tener una concentración inicial de 1,0 mg/L a una concentración final de 0,06 mg/L lo que equivale a un porcentaje de remoción del 94%; en el segundo acuario (A5), el cual presentaba una concentración inicial de cromo de 2,0 mg/L se halló una reducción en la concentración del metal arrojando un resultado de 0,06 mg/L que equivale a un porcentaje de remoción del 97% . Tal como se muestran en la tabla 21.

En este mismo sentido en la tabla 7 y 8, se describe el cálculo para la determinación del % de remoción en el cromo en A1 y A5.

### Tabla 7

*Cálculo para determinar el % de remoción de Cromo en acuario A1.*

Datos	Ecuación para determinar % de remoción	Cálculo para determinar el % de remoción
$S_o = 1 \frac{mg}{L}$ $S = 0,06 \frac{mg}{L}$	$\%R = \frac{S_o - S}{S_o} \times 100$	$\%R = \frac{1 \frac{mg}{L} - 0,06 \frac{mg}{L}}{1 \frac{mg}{L}} \times 100 = 94\%$

En la tabla 7, se describen los datos requeridos y el procedimiento para la determinación del % de cromo en el acuario A1.

**Tabla 8**

*Cálculo para determinar el % de remoción de Cromo en acuario A5.*

Datos	Ecuación para determinar % de remoción	Cálculo para determinar el % de remoción
$S_0 = 2 \frac{mg}{L}$ $S = 0,06 \frac{mg}{L}$	$\%R = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100$	$\%R = \frac{2 \frac{mg}{L} - 0,06 \frac{mg}{L}}{2 \frac{mg}{L}} \times 100 = 97\%$

En la tabla 8, se describen los datos requeridos y el procedimiento para la determinación del % de cromo en el acuario A5.

De lo cual se infiere que a mayor concentración de cromo presente en las aguas contaminadas con metales pesados la macrófita *Lemna minor* desarrolla una mayor capacidad de bioacumulación o biorremediación.

#### 4.2. Remoción de Hierro

En el proceso de biorremediación de hierro por medio de la macrófita *Lemna minor*, los resultados reportados por el laboratorio LAGSA (ver anexo 2. p. 106), se consignan en la tabla 9. Donde es de resaltar que el laboratorio reporta los resultados promedios del análisis por duplicado que realizó. Para determinar la pertinencia de dichos resultados, se les realiza un análisis estadístico unidireccional ANOVA por medio del software *GraphPad Prism 6*, el cuál esta dispuesto en la tabla 10.

**Tabla 9**

*Resultados biorremediación de Hierro, analizados por EAA*

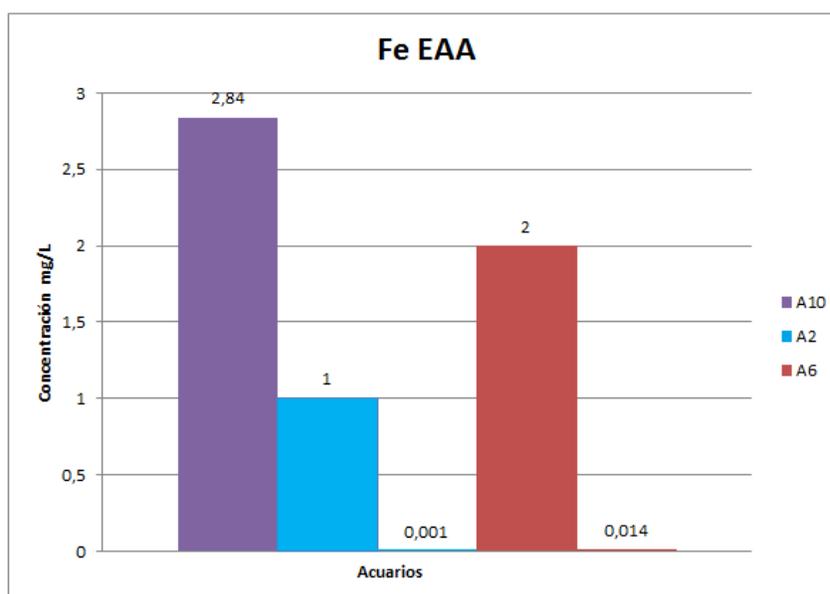
Acuarios	Cantidad de <i>Lemna minor</i> (g)	Volumen Inicial (mL)	Volumen Final (mL)	Tasa de evaporación (%)	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	Remoción (%)
A2	126	500	211	55,8	1	0,0010	99,9
A6	126	500	222	55,6	2	0,0141	99,3
A9	126	500	219	56,2	---	---	---
A10	---	500	226	54,8	2,84	2,84	---

En la tabla 9, se muestra los resultados obtenidos del proceso de biorremediación del hierro por espectrofotometría de absorción atómica.

**Tabla 10***Análisis estadístico ordinario unidireccional ANOVA para Fe por EAA*

N.	Control	1 mg/L	2 mg/L
Number of values	2	2	2
Minimum	2.830	0.0010	0.0141
25% Percentile	2.830	0.0010	0.0141
Median	2.845	0.0010	0.0146
75% Percentile	2.860	0.0010	0.0151
Maximum	2.860	0.0010	0.0151
Mean	2.845	0.0010	0.0146
Std. Deviation	0.02121	0.0	0.0007071
Std. Error of Mean	0.01500	0.0	0.0005000
Lower 95% CI	2.654	0.0010	0.008247
Upper 95% CI	3.036	0.0010	0.02095

En la tabla 10, se dispone de la tabla estadística descriptiva del análisis ordinario unidireccional ANOVA para Fe por espectrofotometría de absorción atómica



**Gráfica 2.** Resultados biorremediación de Hierro. Analizado por espectrofotometría de absorción atómica. Fuente: elaboración del autor.

En lo que concierne al proceso *in vitro* de remoción de hierro, se utilizaron dos acuarios de polipropileno (A2 y A6), cada uno conteniendo una solución de 500 mL de hierro a 1,0 mg/L y 2,0 mg/L respectivamente; posteriormente se sembraron los 126 g de

peso en seco de *Lemna minor* y se realizó el proceso de biorremediación durante un periodo de siete días (168 h), controlando la temperatura en  $25 \pm 2$  °C, la humedad en 60 % y los fotoperiodos de 12/12 h (Pietrini *et al.*, 2016, p.80), simultáneamente se hizo el proceso de registro de disminución del nivel de agua en los acuarios generado por los procesos de evaporación y/o metabólicos de la planta.

Culminado el séptimo día se retiraron las plantas de los acuarios, posteriormente a las muestras de agua proveniente de los acuarios (A2, A6, A9 y A10) se le realizó un proceso de filtrado y de digestión ácida con los propósitos de: eliminar cualquier rastro de material orgánico, oxidar los metales presentes con el fin de eliminar interferencias que pudieran alterar los resultados obtenidos y de conservar la muestra para su posterior análisis; dichas muestras se depositaron en viales de color ámbar (previamente purgados con HNO<sub>3</sub> al 10% v/v) con capacidad de 10 mL (para evitar la reacción de los metales con la luz solar), finalmente se realizaron por duplicado los análisis de las muestras recolectadas en los recipientes A2, A6, A9 y A10 (acuarios experimentales y de control respectivamente) a través del espectrofotómetro de absorción atómica Thermo Scientific de referencia ICE 3000 Series AA acoplado a un horno de grafito de referencia GFS33, con los resultados obtenidos por la técnica analítica se identificaron los porcentajes de remoción utilizando la fórmula de carga de contaminante, por lo cual se determinó que en el primer acuario (A2) hubo una disminución en la concentración de hierro por parte de la *Lemna minor* debido a que pasó de tener una concentración inicial de 1,0 mg/L a una concentración final de 0,001 mg/L lo que equivale a un porcentaje de remoción del 99,9%; en el segundo acuario (A6), el cual presentaba una concentración inicial de hierro de 2,0 mg/L se halló una reducción en la concentración del metal arrojando un resultado de 0,0141 mg/L que equivale a un porcentaje de remoción del 99,3%. Tal como se muestran en la tabla 21.

En este mismo sentido en la tabla 11 y 12, se describe el cálculo para la determinación del % de remoción en el hierro en A2 y A6.

**Tabla 11**

*Cálculo para determinar el % de remoción de Hierro en acuario A2.*

Datos	Ecuación para determinar % de remoción	Cálculo para determinar el % de remoción
$S_0 = 1 \frac{mg}{L}$ $S = 0,001 \frac{mg}{L}$	$\%R = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100$	$\%R = \frac{1 \frac{mg}{L} - 0,001 \frac{mg}{L}}{1 \frac{mg}{L}} \times 100 = 99,9\%$

En la tabla 11, se describen los datos requeridos y el procedimiento para la determinación del % de hierro en el acuario A2.

**Tabla 12**

*Cálculo para determinar el % de remoción de Hierro en acuario A6.*

Datos	Ecuación para determinar % de remoción	Cálculo para determinar el % de remoción
$S_0 = 2 \frac{mg}{L}$ $S = 0,00144 \frac{mg}{L}$	$\%R = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100$	$\%R = \frac{2 \frac{mg}{L} - 0,00144 \frac{mg}{L}}{2 \frac{mg}{L}} \times 100 = 99,3\%$

En la tabla 12, se describen los datos requeridos y el procedimiento para la determinación del % de hierro en el acuario A6.

En lo cual se deduce que a mayor concentración de hierro en las aguas contaminadas con metales pesados la macrófita *Lemna minor* presenta una mayor capacidad de bioacumulación o biorremediación.

### 4.3. Remoción de Manganeso

En el proceso de biorremediación de manganeso por medio de la macrófita *Lemna minor*, los resultados reportados por el laboratorio LAGSA (ver anexo 3. p. 107), se consignan en la tabla 13. Donde es de resaltar que el laboratorio reporta los resultados promedios del análisis por duplicado que realizó. Para determinar la pertinencia de dichos resultados, se les realiza un análisis estadístico unidireccional ANOVA por medio del software *GraphPad Prism 6*, el cuál esta dispuesto en la tabla 14.

**Tabla 13***Resultados biorremediación de Manganeso, analizados por EAA*

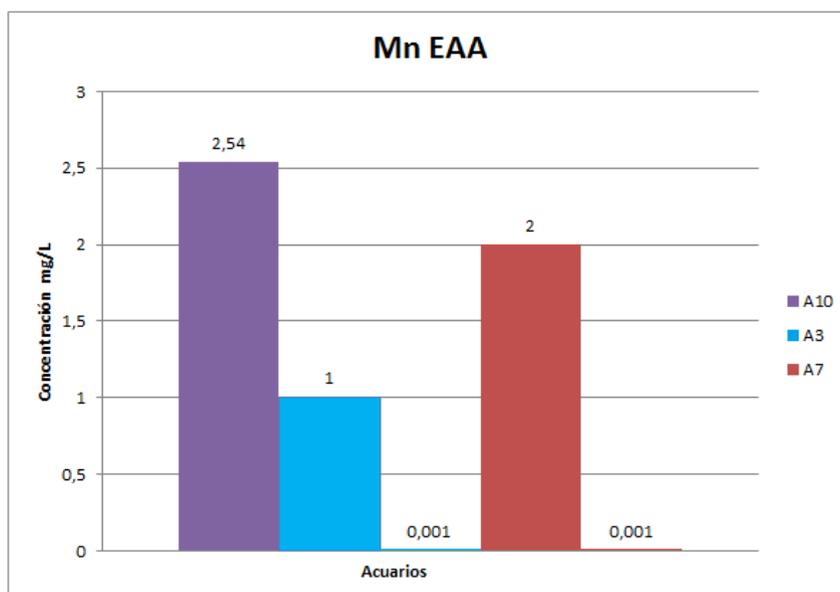
Acuarios	Cantidad de <i>Lemna minor</i> (g)	Volumen Inicial (mL)	Volumen Final (mL)	Tasa de evaporación (%)	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	Remoción (%)
A3	126	500	210	58	1	0,001	99,9
A7	126	500	203	59,4	2	0,001	100
A9	126	500	219	56,2	---	---	---
A10	---	500	226	54,8	2,54	2,54	---

En la tabla 13, se muestra los resultados obtenidos del proceso de biorremediación del manganeso por espectrofotometría de absorción atómica.

**Tabla 14***Análisis estadístico ordinario unidireccional ANOVA para Mn por EAA*

N.	Control	1 mg/L	2 mg/L
Number of values	2	2	2
Minimum	2.300	0.0010	0.0010
25% Percentile	2.300	0.0010	0.0010
Median	2.545	0.0010	0.0010
75% Percentile	2.790	0.0010	0.0010
Maximum	2.790	0.0010	0.0010
Mean	2.545	0.0010	0.0010
Std. Deviation	0.3465	0.0	0.0
Std. Error of Mean	0.2450	0.0	0.0
Lower 95% CI	-0.5680	0.0010	0.0010
Upper 95% CI	5.658	0.0010	0.0010

En la tabla 14, se dispone de la tabla estadística descriptiva del análisis ordinario unidireccional ANOVA para Mn por espectrofotometría de absorción atómica



**Gráfica 3.** Resultados biorremediación de Manganese. Analizado por espectrofotometría de absorción atómica. Infografía elaborada por los fines pertinentes de esta investigación.

En lo que concierne al proceso *in vitro* de remoción de manganeso, se utilizaron dos acuarios de polipropileno (A3 y A7), cada uno conteniendo una solución de 500 mL de hierro a 1,0 mg/L y 2,0 mg/L respectivamente; posteriormente se sembraron los 126 g de peso en seco de *Lemna minor* y se realizó el proceso de biorremediación durante un periodo de siete días (168 h), controlando la temperatura en  $25 \pm 2$  °C, la humedad en 60 % y los fotoperiodos de 12/12 h (Pietrini *et al.*, 2016, p.80), simultáneamente se hizo el proceso de registro de disminución del nivel de agua en los acuarios, el cual fue generado por los procesos de evaporación y/o metabólicos de la planta.

Culminado el séptimo día se retiraron las plantas de los acuarios, posteriormente a las muestras de agua proveniente de los acuarios (A3, A7, A9 y A10) se le realizó un proceso de filtrado y de digestión ácida con los propósitos de: eliminar cualquier rastro de material orgánico, oxidar los metales presentes con el fin de eliminar interferencias que pudieran alterar los resultados obtenidos y de conservar la muestra para su posterior análisis; dichas

muestras se depositaron en viales de color ámbar (previamente purgados con HNO<sub>3</sub> al 10% v/v) con capacidad de 10 mL (para evitar la reacción de los metales con la luz solar), finalmente se realizaron por duplicado los análisis de las muestras recolectadas en los recipientes A3, A7, A9 y A10 (acuarios experimentales y de control respectivamente) a través del espectrofotómetro de absorción atómica Thermo Scientific de referencia ICE 3000 Series AA acoplado a un horno de grafito de referencia GFS33, con los resultados obtenidos por la técnica analítica se identificaron los porcentajes de remoción utilizando la fórmula de carga de contaminante, por lo cual se determinó que en el primer acuario (A3) hubo una disminución en la concentración de manganeso por parte de la *Lemna minor* debido a que pasó de tener una concentración inicial de 1,0 mg/L a una concentración final de 0,001 mg/L lo que equivale a un porcentaje de remoción del 99,9%; en el segundo acuario (A6), el cual presentaba una concentración inicial de hierro de 2,0 mg/L se halló una reducción en la concentración del metal arrojando un resultado de 0,001 mg/L que equivale a un porcentaje de remoción del 100%. Tal como se muestra en la tabla 21.

En este mismo sentido en la tabla 15 y 16, se describe el cálculo para la determinación del % de remoción en el manganeso en A3 y A7.

### Tabla 15

*Cálculo para determinar el % de remoción de Manganeso en acuario A3.*

Datos	Ecuación para determinar % de remoción	Cálculo para determinar el % de remoción
$S_0 = 1 \frac{mg}{L}$ $S = 0,001 \frac{mg}{L}$	$\%R = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100$	$\%R = \frac{1 \frac{mg}{L} - 0,001 \frac{mg}{L}}{1 \frac{mg}{L}} \times 100 = 99,9\%$

En la tabla 15, se describen los datos requeridos y el procedimiento para la determinación del % de manganeso en el acuario A3.

**Tabla 16**

*Cálculo para determinar el % de remoción de Manganeso en acuario A7.*

Datos	Ecuación para determinar % de remoción	Cálculo para determinar el % de remoción
$S_0 = 2 \frac{mg}{L}$ $S = 0,001 \frac{mg}{L}$	$\%R = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100$	$\%R = \frac{2 \frac{mg}{L} - 0,001 \frac{mg}{L}}{2 \frac{mg}{L}} \times 100 = 100\%$

En la tabla 16, se describen los datos requeridos y el procedimiento para la determinación del % de manganeso en el acuario A7.

De lo cual se infiere que a mayor concentración de manganeso en las aguas contaminadas con metales pesados la macrófita *Lemna minor* presenta una mayor capacidad de bioacumulación o biorremediación.

#### 4.4. Remoción de Zinc

En el proceso de biorremediación de zinc por medio de la macrófita *Lemna minor*, los resultados reportados por el laboratorio LAGSA (ver anexo 4. p. 108), se consignan en la tabla 17. Donde es de resaltar que el laboratorio reporta los resultados promedios del análisis por duplicado que realizó. Para determinar la pertinencia de dichos resultados, se les realiza un análisis estadístico unidireccional ANOVA por medio del software *GraphPad Prism 6*, el cuál está dispuesto en la tabla 18.

**Tabla 17**

*Resultados biorremediación de Zinc, analizados por EAA.*

Acuarios	Cantidad de <i>Lemna minor</i> (g)	Volumen Inicial (mL)	Volumen Final (mL)	Tasa de evaporación (%)	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	Remoción (%)
A4	126	500	211	57,8	1	0,001	99,9
A8	126	500	193	61,4	2	0,0044	99,8
A9	126	500	219	56,2	---	---	---
A10	---	500	226	54,8	2,46	2,46	---

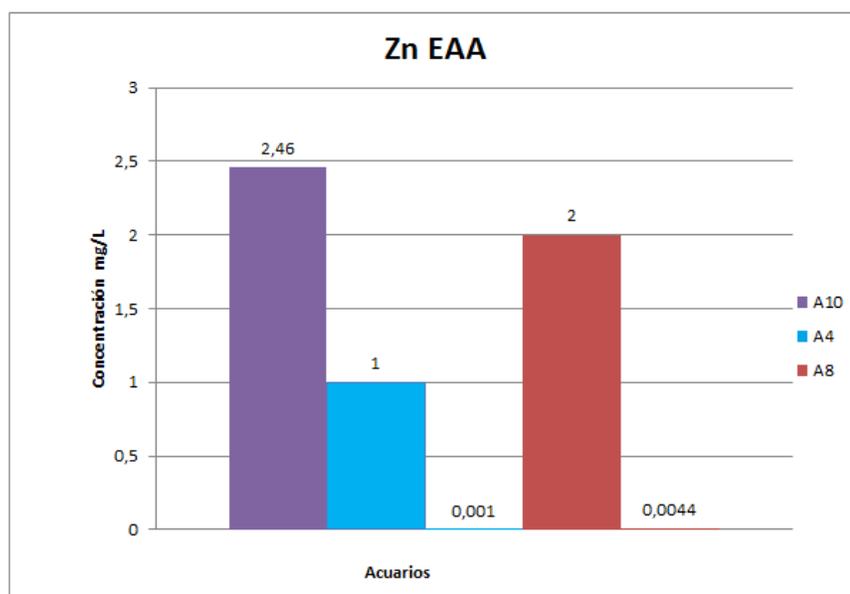
En la tabla 17, se muestra los resultados obtenidos del proceso de biorremediación del zinc por espectrofotometría de absorción atómica.

**Tabla 18**

*Análisis estadístico ordinario unidireccional ANOVA para Zn por EAA*

N.	Control	1 mg/L	2 mg/L
Number of values	2	2	2
Minimum	2.170	0.0010	0.0044
25% Percentile	2.170	0.0010	0.0044
Median	2.465	0.0010	0.00455
75% Percentile	2.760	0.0010	0.0047
Maximum	2.760	0.0010	0.0047
Mean	2.465	0.0010	0.00455
Std. Deviation	0.4172	0.0	0.0002121
Std. Error of Mean	0.2950	0.0	0.00015
Lower 95% CI	-1.283	0.0010	0.002644
Upper 95% CI	6.213	0.0010	0.006456

En la tabla 18, se dispone de la tabla estadística descriptiva del análisis ordinario unidireccional ANOVA para Zn por espectrofotometría de absorción atómica



**Gráfica 4.** Resultados biorremediación de Zinc. Analizado por espectrofotometría de absorción atómica.

Fuente: elaboración del autor.

En lo que concierne al proceso *in vitro* de remoción de zinc, se utilizaron dos acuarios de polipropileno (A4 y A8), cada uno conteniendo una solución de 500 mL de zinc a 1,0 mg/L y 2,0 mg/L respectivamente; posteriormente se sembraron los 126 g de peso en seco

de *Lemna minor* y se realizó el proceso de biorremediación durante un periodo de siete días (168 h), controlando la temperatura en  $25 \pm 2$  °C, la humedad en 60 % y los fotoperiodos de 12/12 h (Pietrini *et al.*, 2016, p.80), simultáneamente se hizo el proceso de registro de disminución del nivel de agua en los acuarios, el cual fue generado por los procesos de evaporación y/o metabólicos de la planta.

Culminado el séptimo día se retiraron las plantas de los acuarios, posteriormente a las muestras de agua proveniente de los acuarios (A4, A8, A9 y A10) se le realizó un proceso de filtrado y de digestión ácida con los propósitos de: eliminar cualquier rastro de material orgánico, oxidar los metales presentes con el fin de eliminar interferencias que pudieran alterar los resultados obtenidos y de conservar la muestra para su posterior análisis; dichas muestras se depositaron en viales de color ámbar (previamente purgados con HNO<sub>3</sub> al 10% v/v) con capacidad de 10 mL (para evitar la reacción de los metales con la luz solar), finalmente se realizaron por duplicado los análisis de las muestras recolectadas en los recipientes A4, A8, A9 y A10 (acuarios experimentales y de control respectivamente) a través del espectrofotómetro de absorción atómica Thermo Scientific de referencia ICE 3000 Series AA acoplado a un horno de grafito de referencia GFS33, con los resultados obtenidos por la técnica analítica se identificaron los porcentajes de remoción utilizando la fórmula de carga de contaminante, por lo cual se determinó que en el primer acuario (A4) hubo una disminución en la concentración de zinc por parte de la *Lemna minor* debido a que pasó de tener una concentración inicial de 1,0 mg/L a una concentración final de 0,001 mg/L lo que equivale a un porcentaje de remoción del 99,9%; en el segundo acuario (A8), el cual presentaba una concentración inicial de hierro de 2,0 mg/L se halló una reducción en la concentración del metal arrojando un resultado de 0,0044 mg/L que equivale a un porcentaje de remoción del 99,8% . Tal como se enuncia en la tabla 21.

En este mismo sentido en la tabla 19 y 20, se describe el cálculo para la determinación del % de remoción en el zinc en A4 y A8.

**Tabla 19**

*Cálculo para determinar el % de remoción de Zinc en acuario A4.*

Datos	Ecuación para determinar % de remoción	Cálculo para determinar el % de remoción
$S_0 = 1 \frac{mg}{L}$ $S = 0,001 \frac{mg}{L}$	$\%R = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100$	$\%R = \frac{1 \frac{mg}{L} - 0,001 \frac{mg}{L}}{1 \frac{mg}{L}} \times 100 = 99,9\%$

En la tabla 19, se describen los datos requeridos y el procedimiento para la determinación del % de zinc en el acuario A4.

**Tabla 20**

*Cálculo para determinar el % de remoción de Zinc en acuario A8.*

Datos	Ecuación para determinar % de remoción	Cálculo para determinar el % de remoción
$S_0 = 2 \frac{mg}{L}$ $S = 0,0044 \frac{mg}{L}$	$\%R = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100$	$\%R = \frac{2 \frac{mg}{L} - 0,0044 \frac{mg}{L}}{2 \frac{mg}{L}} \times 100 = 99,8\%$

En la tabla 20, se describen los datos requeridos y el procedimiento para la determinación del % de zinc en el acuario A8.

De lo cual se infiere que a mayor concentración de zinc presente en las aguas contaminadas con metales pesados la macrófita *Lemna minor* desarrolla una mayor capacidad de bioacumulación o biorremediación.

## 5. DISCUSIONES

*“Todos somos muy ignorantes, lo que ocurre es que no todos ignoramos las mismas cosas”*

Albert Einstein, Nobel de Física.

Una vez terminado el proceso de indagación sobre los antecedentes experimentales de la *Lemna minor* se hace evidente el austero estudio de las capacidades y el comportamiento de la lenteja de agua y los pocos registros hallados como documento científico, la información hallada con respecto a esta macrófita es con frecuencia escasa y en el peor de los casos corta, limitada y superflua, dejándola en el plano de una planta plaga indeseable para los acuarios.

La lenteja de agua tiene muchos usos o bondades como por ejemplo servir de biomasa para la alimentación de animales en especial de ganado (bovino, caprino, porcino, equino, ovino) y pescados ya que ellas tienden a acumular una gran cantidad de nutrientes esenciales que son de mucha importancia para la dieta de ellos, e incluso para el ser humano. En el campo de la depuración de aguas contaminadas la lenteja de agua posee dos características especiales, la primera es su alta tasa de proliferación, de hecho es de las angiospermas de más alta capacidad reproductiva, la segunda es su gran capacidad de acumulación de nutrientes o contaminantes, la combinación de estas dos características conlleva a que la *Lemna minor* sea una de las macrófitas más aptas para la biorremediación de agentes extraños disueltos en el agua (Arroyave, 2004, p. 35)

Sin embargo y aunque con frecuencia se asocian estas plantas a la idea de individuos vivientes que tienen la capacidad de realizar aportes positivos y significativos a un ecosistema o al medio ambiente en general (Armstrong, 2003, p. 5); (Arroyave, 2004, p. 34); (Rook, 2002, p. 31); (Roldán, 1992, p. 12); en el caso específico de la *Lemna minor*

distintos estudios señalan que esta planta presenta una altísima tasa de reproducción en cuerpos de agua dulce, sin embargo estos mismos estudios señalan que en cuerpos de agua dulce eutrofizados (ricos en nutrientes como nitrógeno y fósforo) crece de manera exponencial conllevando la disminución del oxígeno disuelto en el agua generando un fenómeno conocido como anoxia, el estancamiento del agua ocasiona la sedimentación y reducción del volumen del cuerpo líquido, lo cual impide el desarrollo normal de la vida en los cuerpos acuáticos, lo que hace que finalmente todos los animales presentes en el agua mueran ahogados, proceso que podría terminar en el deterioro de lagos, lagunas, ríos y quebradas de flujo lento, transformándolos en cuerpos que no pueden sustentar vida.

La lenteja de agua sin el cuidado y control adecuado puede transformar un cuerpo líquido de flujo lento como un lago, en un pantano (Roldán G. , 2006, p. 451)

En varios estudios se ha documentado que la *Lemna minor* tiene una gran capacidad bioacumuladora de nutrientes y/o contaminantes principalmente en su talo (tejidos con poca diferenciación del tallo y hojas), lo que puede ocasionar una serie de ventajas y desventajas; si los contaminantes son nutrientes la lenteja de agua se puede utilizar como suplemento alimenticio para algunos seres vivos, sin embargo, si los contaminantes son tóxicos la lenteja de agua se puede convertir en un agente altamente contaminante, es por ello que investigaciones argumentan que después de los procesos de fitorremediación con metales pesados se han optado por calcinar las muestras vegetales con todas las normas de seguridad pertinentes, lo cual incluye el entierro de estas para evitar el contacto humano con estos contaminantes de cualidades tóxicas (Roldán G. , 2006, p. 451)

Otro aspecto a tener en cuenta es el uso de la técnica fitorremediadora, el cual siempre ha sido en pequeña escala o en laboratorio; aspecto que inquieta y conlleva a cuestionar cuáles podrían ser los hallazgos y el comportamiento de las plantas y del mismo

proceso de fitorremediación en un ecosistema real (de grandes o de colosales dimensiones) contaminado por los metales que son objeto de estudio en esta investigación (y que en situaciones reales podrían estar acompañados de otros metales pesados o agentes contaminantes ajenos a este proceso de estudio), al variar el tamaño de la investigación es posible que aparezcan variables nuevas, objeciones o comportamientos no observados en el proceso *in vitro*, el proceso a escala real requeriría también de un equipo de trabajo mucho más amplio teniendo en cuenta la capacidad de reproducción acelerada de la lenteja de agua. Sin embargo, no se debe pasar por alto los evidentes resultados de fitorremediación de la *Lemna minor* trabajada *in vitro*, los cuales señalan que todos los metales pesados objetos estudio de esta investigación (cromo, hierro, manganeso y zinc) analizados en las muestras de agua obtenidas en los 8 acuarios experimentales cuyas concentraciones fueron de 1,0 mg/L y 2,0 mg/L y los 2 acuarios de control, obtuvieron los siguientes porcentajes de remoción: Para el caso del elemento hierro, los porcentajes de remoción oscilan entre el 99,3% y 99,9% respectivamente. En el caso del manganeso, se determinó que los porcentajes de remoción varían entre 99,9% y 100%, en el cromo se obtuvieron porcentajes de remoción que fluctúan entre 94% y 97%; el último metal en ser analizado fue el zinc, con porcentajes de remoción fluctuantes entre 99,8% y 99,9%; dejando en claro que en este proceso se efectúa un proceso de digestión ácida de la muestra para la EAA, según el protocolo del IDEAM.

De lo cual se infiere que estos metales a pesar de ser altamente tóxicos, contaminantes y masivamente insertados en los ecosistemas acuáticos por la industria nacional e internacional pueden ser removidos del agua casi en su totalidad con prácticas muy económicas, de fácil manipulación y totalmente amigables con el ecosistema, como lo es la técnica de fitorremediación articulada en el uso de la *Lemna minor*.

Finalmente es importante recomendar que continúen realizando estudios investigativos, en los que se profundicen sobre la capacidad que posee la macrófita; además de los saberes que argumentan que esta puede ser la materia prima para remediar algunas enfermedades de la piel como la psoriasis.

## 6. CONCLUSIONES

En este apartado se dispone de la tabla 21, la cual muestra el porcentaje de bioremediación, obtenido por el estudio investigativo, a fin de identificar el nivel de eficacia en la utilización de la macrófita *Lemna minor* para el tratamiento de aguas residuales, al estar contaminados por metales pesados. Asimismo, se describen los valores de concentración inicial y final de cada uno de los metales pesados empleados, con sus respectivos acuarios experimentales.

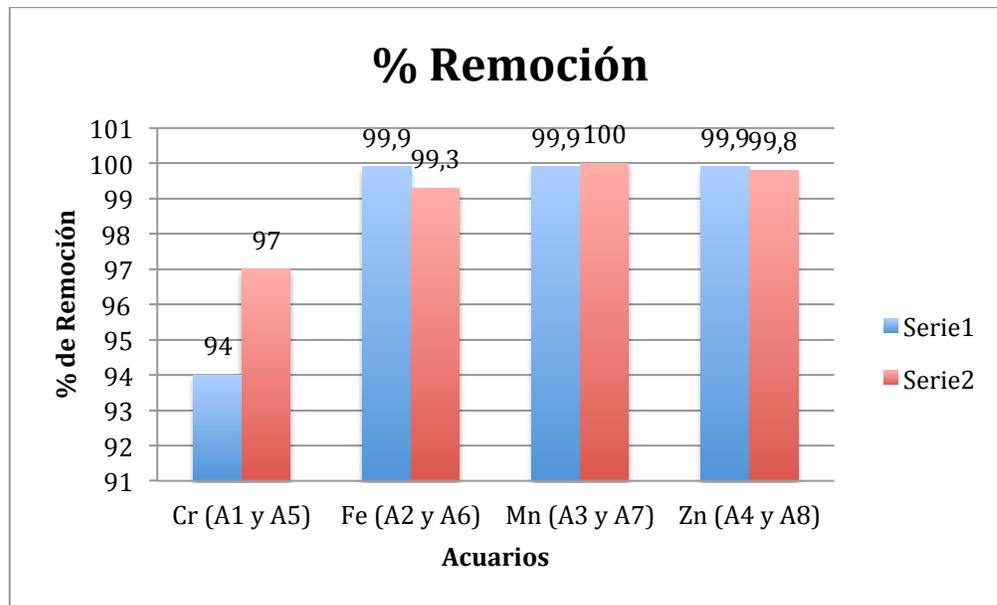
**Tabla 21**

*Porcentaje de remoción de metales pesados: Cr, Fe, Mn, Zn.*

Acuarios	Cantidad de <i>Lemna minor</i> (g)	Metal	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	Remoción (%)
A1	126	Cr	1	0,06	94
A5	126		2	0,06	97
A2	126	Fe	1	0,0010	99,9
A6	126		2	0,0144	99,3
A3	126	Mn	1	0,001	99,9
A7	126		2	0,001	100
A4	126	Zn	1	0,001	99,9
A8	126		2	0,0044	99,8

En la tabla 21, se describe las cantidades de *Lemna minor* empleada para el estudio experimental, además de las concentraciones iniciales y finales de cada uno de los metales pesados empleados, en donde se identifica claramente el porcentaje de remoción de agentes contaminantes.

En este mismo sentido, se dispone de la grafica 5., en donde se muestran los porcentajes de remoción para posteriormente describir las conclusiones del estudio investigativo.



**Gráfica 5.** Porcentaje de remoción de metales pesados con *Lemna minor*. Fuente: Elaboración del autor, en donde se evidencia el porcentaje y la eficiencia del uso de la *Lemna minor* para la bioremediación de metales pesados en aguas residuales contaminadas por este tipo de sustancias.

En lo que se refiere al proceso que se ha ejecutado para interés de esta investigación de laboratorio *in vitro*, se concluye que el proceso posee un rápido desarrollo, ya que se comprobó que se requiere de solo siete días para encontrar los mejores resultados en la práctica de la depuración de las aguas contaminadas con metales pesados haciendo uso de la *Lemna minor*; la rapidez sumada a los bajos costos de inversión económica y a la sencillez de la práctica de intervención, hacen que este proceso resulte como una solución alternativa, valiosísima y eficaz, en el tema de tratamiento y conservación de las aguas la cual paradójicamente resulta austeramente conocida y pobremente practicada en la geografía nacional y aun en la esfera internacional.

En lo pertinente a la técnica empleada para el análisis y cuantificación de los metales pesados presentes en el agua a través de la *Lemna minor*, la técnica de espectrofotometría de absorción atómica, se evidencio su rigurosidad y veracidad en la entrega de resultados; demostrando que esta técnica es altamente confiable con lo cual se evidencia porque los

laboratorios científicos de vanguardia a nivel nacional e internacional hacen uso de ella en su práctica cotidiana.

En lo que respecta a la *Lemna minor* se concluye que es una de las macrófitas más eficientes en la bioacumulación de contaminantes (metales pesados) presentes en las aguas, debido a que reúne ciertas características que la hacen una planta promisoría en la depuración de estas, entre las características evidenciadas más importantes sobresalen: su alta tasa de proliferación (crecimiento), gran capacidad de bioacumulación de los contaminantes disueltos en el agua. unísonamente se corroboró que la lenteja de agua al ser una planta tropical tiene una alta tolerancia a las temperaturas y a la variación climática (10-30 °C), (Armstrong, 2003, p. 5); (Arroyave, 2004, p. 34); (Rook , 2002, p. 31); (Roldán, 1992, p. 12)

Así mismo se concluye que es una planta con un enorme potencial biorremediador el cual podría ser muy efectivo en la solución de problemas de contaminación vigentes en el panorama local, nacional e internacional; pero lastimosamente muy poco explorado, conocido y difundido por la academia, la doxa, o las prácticas de saberes ancestrales y/o artesanales. La *Lemna minor* es una solución ecológica que podría funcionar a gran escala frente al panorama adverso de uso y abuso del ambiente por parte de la industria y de diversas prácticas antropogénicas.

Finalmente en lo pertinente al centro de esta investigación se concluyó que los resultados obtenidos del proceso de biorremediación de los metales pesados presentes en el agua por medio de la *Lemna minor* son altamente promisorios, al calcular los porcentajes de remoción para cada metal se encontró que para el elemento cromo hubo remociones entre el 94% y 97%, siendo para este metal los porcentajes de remoción más bajos; sin embargo para el elemento hierro se hallaron porcentajes de remoción superiores al 99%

(99,3% y 99,9%); en el caso del manganeso, se calculó porcentajes de remoción superiores al 99,8% (99,9% y 100%), el último metal en ser analizado fue el zinc, que también presentó resultados muy similares al de los metales descritos anteriormente con porcentajes de remoción superiores al 99,7% (99,8% y 99,9%); En lo pertinente al proceso de EAA se aclara que si se desarrolló el proceso de digestión ácida de acuerdo al protocolo IDEAM establecido; por lo cual de todo lo dicho anteriormente se infiere que estos metales a pesar de ser altamente tóxicos, contaminantes y masivamente insertados en los ecosistemas acuáticos por la industria nacional e internacional pueden ser removidos del agua casi que en su totalidad con prácticas muy económicas, de fácil manipulación y totalmente amigables con el ecosistema, como lo es con el uso de la *Lemna minor*.

## BIBLIOGRAFÍA

- A.T.S.D.R. (2000). Resumen de salud pública Manganese. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. , 1-12.
- Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Mentasti, E., Sarzanini, C., & Barberis, R. (2002). Distribution and mobility of metals in contaminated sites. Chemometric investigation of pollutant profiles. *Environmental Pollution* , 119, 177-193.
- Adriano, D., Wenzel, W., Vangronsveld, J., & Bolan, N. (2004). Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. *Geoderma* , 121-142.
- Aguilar, A., & Aguilar, H. (2017). Sistemas piloto de fitorremediación para el tratamiento de aguas ácidas de los pasivos ambientales mineros de la quebrada Mesa de Plata - Hualgayoc. UPAGU , 1-17.
- Aldana, E. (2014). Remoción de aluminio en aguas residuales industriales usando especies macrófitas: una aplicación para el pasto vetiver. Manizales: Universidad Católica de Manizales.
- Alegría, J., Ocampo, L., Rodríguez, F., & Forlerer, E. (2016). Comportamiento de un recubrimiento bicapa de Cr/CrN bajo degradación por erosión-corrosión por ensayo de impacto con chorro. *DYNA* , 145-152.
- Alegría, J., Ocampo, L., Rodríguez, F., & Forlerer, E. (2016). Comportamiento de un recubrimiento bicapa de Cr/CrN bajo degradación por erosión-corrosión por ensayo de impacto con chorro. *DYNA* , 145-152.
- Appenroth, K., & Krech, J. (2010). Effects of nickel on the chloroplasts of the duckweeds *Spirodela polyrhiza* and *Lemna minor* and their possible use in biomonitoring and phytoremediation.
- Arauzo, M., Rivera, M., Valladolid, M., Noreña , C., & Cedenilla, O. (2003). Contaminación por cromo en el agua intersticial, en el agua del cauce y en los sedimentos del río Jarama. *Limnetica* , 85-98.
- Arenas, A., Marcó, L., & Torres, G. (2011). Evaluación de la planta *Lemna minor* como biorremediadora de aguas contaminadas con mercurio. *Avances en Ciencias e Ingeniería* , 1-11.
- Armstrong, W. (2003). Wayne's Word Lemnaceae Online.

- Arroyave, M. (2004). La lenteja de agua (*Lemna minor* L.) una planta acuática promisoría. *EIA* , 33-38.
- Bocanegra, C. (1998). Contaminación del Litoral Marino. Trujillo.
- Bryan, G. (1976). Some aspects of heavy metal tolerance in Aquatic organisms. (A.P.M. Lockwood, ed.), *Effects of pollutants on Aquatic organisms*. Cambridge University Press , 193.
- Cardenas, J., & Acosta, I. (2011). Remoción de Cromo Hexavalente por el Hongo *Paecilomyces*. 22.
- Carranza, R. (2001). Medio ambiente: problemas y soluciones. Perú: Universidad Nacional del Callao.
- Casierra, F., & Poveda, J. (2005). La toxicidad por exceso de Mn y Zn disminuye la producción de materia seca, los pigmentos foliares y la calidad del fruto en fresa (*Fragaria* sp. cv. Camarosa). *Agronomía Colombiana* , 283-289.
- Castrillón, V., & Navarro, L. (2016). Evaluación de la Fitorremediación como Alternativa para el Tratamiento de Aguas Residuales Contaminadas con Mercurio Producto de la Minería Aurífera (artesanal y pequeña escala). Manizales: Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD.
- Chara, J. (1998). El potencial de las excretas porcinas para uso múltiple y los sistemas de descontaminación productiva.
- Chaudhary, E., & Sharma, P. (2012). Duckweed as ecofriendly tool for phytoremediation. *International Journal of Science and Research* , 1615-1617.
- Cherian, S., & Oliveira, M. (2006). Transgenic Plants in Phytoremediation: Recent Advances and New Possibilities. *Environmental Science and Technology* , 9377-9390.
- Cook, C., & Gut, B. (1974). *Water plants of the world: A manual for the identification of the genera of freshwater macrophytes*. The Hague Junk.
- Delgadillo, A., González, C., Prieto, F., Villagómez, J., & Acevedo, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and subtropical agroecosystems* , 597-612.
- Descalcificador. (2018, Enero 27). Descalcificador 10. Retrieved from Descalcificador 10: <https://descalcificador10.com/agua-potable-historia/>

- Dietz , A., & Schnoor, J. (2001). Advances in phytoremediation. *Environ Health Perspect.* , 163-168.
- Doménech, X., & Peral, J. (2008). *Química Ambiental de sistemas terrestres*. Barcelona: Revert.
- Eapen , S., Suseelan , K., Tivarekar, S., Kotwal , S., & Mitra , R. (2003). Potential for rhizofiltration of uranium using hairy root cultures of *Brassica juncea* and *Chenopodium amaranticolor*. *Environ Res.* , 127-133.
- Eaton, A., Clesceri, L., Rice, E., Greenberg , A., & Franson, M. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater*. Estados Unidos: American Public Health Association.
- El-Monsef AhmedEl-Badry, A., & El-Kammarb, A. (2018). Spatial distribution and environmental geochemistry of zinc metal in water and surficial bottom sediments of Lagoon Burullus, Egypt. *Marine Pollution Bulletin* , 811-816.
- Favas , P., Pratas, J., & Prasad , M. (2012). Accumulation of arsenic by aquatic plants in large-scale field conditions: opportunities for phytoremediation and bioindication. *Sci Total Environ.* , 390-397.
- Flórez, Y., & Cotes, A. (2006). Bioabsorción de metales pesados por *Salvinia natans* de los lixiviados del relleno sanitario Combeima Ibagué. *Tumbaga* , 89-100.
- Frers, C. (2008). El uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. *Observatorio Medioambiental* , 301-305.
- Gamarra, F. (2014). Evaluación del uso de cáscaras de banano (*Musa paradisiaca* sp.) para la descontaminación del agua con metales pesados. Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés.
- Garcia, A., Matamoros, V., Fontás, C., & Salvadó, V. (2015). The influence of *Lemna* sp. and *Spirogyra* sp. on the removal of pharmaceuticals and endocrine disruptors in treated wastewaters. *International journal of environmental science and technology* , 2327-2338.
- Garcia, I., & Dorronsoro, C. (2005). *Contaminación por metales pesados*. Granada: Departamento de Edafología y Química Agrícola. Universidad de Granada.

- Ghori, Z., Iftikhar, H., Bhatti, M., Minullah, N.-u., Sharma, I., Kazi, A., y otros. (2016). Chapter 15 - Phytoextraction: The Use of Plants to Remove Heavy Metals from Soil. *Plant Metal Interaction* , 385-409.
- Ghosh, K., Thompson, A., Goldbeck , R., Shi , X., Whitman , S., Oh , E., y otros. (2005). Spectroscopic and biochemical characterization of heme binding to yeast Dap1p and mouse PGRMC1p. *Biochemistry* , 1-7.
- Gomez, D. (2011). Validacion de la metodologia por el metodo estandar de absorcion atomica para el analisis de metales pesados en aguas residuales. Pereira, Colombia: <http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesis/textoyanexos/5430858G633.pdf>.
- Harvey , P., Campanella , B., Castro, P., Harms, H., Lichtfouse , E., Schäffner , A., y otros. (2002). Phytoremediation of polyaromatic hydrocarbons, anilines and phenols. *Environ Sci Pollut Res Int.* , 29-47.
- Hassan , Z., & Aarts, M. (2011). Opportunities and feasibilities for biotechnological improvement of Zn, Cd or Ni tolerance and accumulation in plants. *Environ. Exp. Bot.*
- Henandez Samperi, R., Fernández Collado, C., & Bautista Lucio, M. (2014). Recuperado el 21 de Noviembre de 2019, de <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>
- Huang, J., Chen, J., Berti, W., & Cunningham, S. (1997). Phytoremediation of Lead-Contaminated Soils: Role of Synthetic Chelates in Lead Phytoextraction. *Environmental Science and Technology* , 800-805.
- IDEAM. (2004). Determinación de metales pesados totales con digestión ácida y solubles lectura directa por espectrofotometría de absorción atómico. Bogotá, Colombia: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Metales+en+agua+por+Absorci%C3%B3n+At%C3%B3mica..pdf/e233a63d-378c-4f83-9311-d9375043cf2a>.
- Instituto Gallach. (1984). *Historia Natural*.
- Kabata Pendias, A., & Pendias, H. (2001). *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press, Boca Raton , 367.
- Katz, S., & Salem, H. (1994). *The Biological and Environmental Chemistry of Chromium*. VCH Publishers , 1-214.

- Khataee, A., Movafeghi, A., Torbati, S., Salehi, S., & Zarei, M. (2012). Phytoremediation potential of duckweed (*Lemna minor* L.) in degradation of C.I. Acid Blue 92: Artificial neural network modeling. *Ecotoxicology and Environmental* , 291-298.
- Khellaf, N., & Zerdaoui, M. (2009). Growth response of the duckweed *Lemna minor* to heavy metal pollution. *Iran. J. Environ. Health. Sci. Eng* .
- Klerks, P., & Levinton, J. (1989). Effects of Heavy Metals in a Polluted Aquatic Ecosystem. *Ecotoxicology: Problems and Approaches* , 41-67.
- Kösesakal, T., Ünal, M., Memon, A., & Yuksel, B. (2016). Phytoremediation of petroleum hydrocarbons by using a freshwater fern species *Azolla filiculoides* Lam. *Int J Phytoremediation* . , 467-476.
- Kumar, P., Ramalingam, S., Sathyselvalabala, V., Kirupha, S., Murugesan, A., & Sivanesan, S. (2012). Removal of cadmium(II) from aqueous solution by agricultural waste cashew nut shell. *Korean Journal of Chemical Engineering* , 756-768.
- Lenntech. (2018, Enero 27). Lenntech. Retrieved from Lenntech:  
<https://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/historia/historia-tratamiento-agua-potable.htm>
- López, S., Gallegos, M., Pérez, L., & Gutiérrez, M. (2005). Mecanismos de Fitorremediación de suelos contaminados con moléculas orgánicas xenobióticas. *Rev. Int. Contam. Ambient.* , 91-100.
- Lozano, S. (2017). Proceso de potabilización. Planta de tratamiento de aguas crudas. Merida: Instituto Universitario “Santiago Mariño”.
- Lucho, C., Álvarez, M., Beltrán, R., Prieto, F., & Poggi, H. (2005). A multivariate analysis of the accumulation and fractionation of major and trace elements in agricultural soils in Hidalgo State, Mexico irrigated with raw wastewater. *Environment International* , 313-323.
- Maiti, R., Hernandez, J., González, J., & López, S. (2004). Plant based bioremediation and mechanisms of heavy metal tolerance of plants: a review. *Proceedings of the Indian National Science Academy, Part B* , 1-12.
- Matute, S., Capote, T., Montilla, M., Padrón, D., & Iglesias, P. (2014). Absorción de hierro total en plantas acuáticas como fitorremediadoras en aguas residuales industriales. Universidad centrooccidental .

- Metcalf, L., & Eddy, H. (1998). *Ingeniería de aguas residuales : tratamiento, vertido y reutilización*. Madrid: McGraw Hill.
- Monje Alvaréz, C. (2011). *Metodología de la Investigacion*. Colombia.
- Nair, J., Leviatan, J., & Oyama, N. (2008). Zinc and copper uptake by silver beet grown in secondary treated effluent. 2537-2543.
- Navarro, J., Aguilar, I., & López, J. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas . *Ecosistemas* , 10-25.
- Nedelkoska, T., & Doran, P. (2000). Characteristics of heavy metal uptake by plant species with potential for phytoremediation and phytomining. *Minerals Engineering* , 549-561.
- Núñez, R., Meas, Y., Ortega, R., & Olguín, E. (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Biotecnología y biología molecular* , 69-82.
- O.M.S. (2006). *Guías para la calidad del agua potable*. Génève: Organización Mundial de la Salud.
- Öbek, E., & Hasar, H. (2002). Role of duckweed (*Lemna minor* L.) harvesting in biological phosphate removal from secondary treatment effluents. *Fresenius Environmental Bulletin* , 27-29.
- Olette, R., Couderchet, M., Biagianti, S., & Eullaffroy, P. (2008). Toxicity and removal of pesticides by selected aquatic plants. *Chemosphere* , 1414-1421.
- Olguin , E., & Hernandez, E. (1998). Use of aquatic plants for recovery of nutrients and heavy metals from wastewater. and heavy: Institute of Ecology.
- Pablos , D., González, R., Romero, O., & Ponce, J. (2011). Producción de la macrófita acuática *Lemna perpusilla* utilizando agua residual de una instalación porcina, con propósitos para producción de biomasa para acuicultura. *Bio ciencias* , 17-27.
- Pájaro, Y., & Diaz , F. (2012). Remoción de cromo hexavalente de aguas contaminadas usando quitosano obtenido de exoesqueleto de camarón . *revista colombiana de química* , 41.
- Pavón , T., Campos, E., & Olguin, M. (2001). ) Remoción de níquel, cadmio y zinc del agua. Mexico.
- Pedraza, G. (1997). Implementación y evaluación de un sistema de descontaminación de aguas servidas con plantas acuáticas. Universidad Javeriana.

- Petrova, V. (1997). Uso de zeolitas naturales en la remoción de manganes. Ingeniería Hidráulica en Mexico .
- Pietrini , F., Bianconi, D., Massacci, A., & Lanelli, M. (2016). Combine effects of elevated CO<sub>2</sub> and Cd- contaminated water on growth, photosynthetic response, Cd accumulation and thiolic component status in Lemna minor.
- Posada, M., & Arroyave, M. (2006). Efectos del mercurio sobre algunas plantas acuáticas tropicales. Rev.EIA.Esc.Ing.Antioq , 57-67.
- Prieto, J., González, C., Román, A., & Prieto, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. Tropical and Subtropical Agroecosystems , 29-44.
- Ramos, G., Pineda L. (2016). Evaluación de Eichhornia crassipes (mart.) Solms. Y Lemna minor (L.) Griff. Como potenciales especies fitorremediadoras, de aguas contaminadas a causa del faenamiento de ganado vacuno y porcino del camal municipal ubicado en el barrio la recta, cantón el Pangui. 4333-4349
- Raven, P., Evert, R., & Eichhorn, S. (1971). New York: Biology of plants .
- Razmilic, B. (22 de 04 de 2016). Control de calidad de insumos y dietas acuícolas. Recuperado el 15 de 03 de 2018, de Control de calidad de insumos y dietas acuícolas: <http://www.fao.org/3/ab482s/AB482S00.htm#TOC>
- Restrepo, I., Sánchez, I., Galvis, A., Rojas, J., & Sanabria, I. (2017). Avances en investigación y desarrollo en agua y saneamiento para el milenio. Colombia: Universidad de Valle.
- Reyes, D., González, R. Romero, O. Ponce, J. Peillón, O. Vargasmachuca, S. & Ruiz, A. (2011). Producción de la macrófita acuática Lemna perpusilla utilizando agua residual de una instalación porcina, con propósitos para producción de biomasa para acuicultura. Revista Bio Ciencias. 1. 1-27
- Rocha, E. (2000). Principios básicos de espectroscopía. Chihuahua: Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Rodríguez, D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados. MEDISAN , 1-14.
- Rodríguez, K. (2005). Eficacia del hongo Pleurotus ostreatus como biorremediador de suelos contaminados con metales pesados. Puerto Rico: Universidad de Puerto Rico.

- Roldan , G., & Alvaréz, L. (2002). Aplicación del Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) para el tratamiento de aguas residuales y opciones de reúso de la biomasa producida. Universidad.
- Roldan, G. (1992). Fundamentos de limnología tropical.
- Roldán, G. (2006). Fundamentos de limnología neotropical. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Rook , E. (2002). Flora, fauna, earth and sky. .
- Roy, S., Labelle, S., Mehta, P., Mihoc, A., Fortin, N., Masson, C., y otros. (2005). Phytoremediation of heavy metal and PAH-contaminated brownfield sites. *Plant and Soil* , 277-290.
- Salazar, H., Rojas, G., Morales, L., Solis, C., & Arévalo , K. (2013). Evaluación de un polímero natural (pectina), para remover plomo cadmio y zinc en disoluciones a nivel laboratorio. Instituto de Biotecnología, .
- Sánchez, A., Reigosa, M., & Bonjoch, N. (2004). La ecofisiología vegetal : una ciencia de síntesis. Madrid: Thomson-Paraninfo.
- Şaşmaz, M. (2014). *Lemna gibba* L. ve *Lemna minor* L. 'ün galeri suyundaki bazı ağır metalleri alım kapasitelerinin karşılaştırılması. *Fen Bilimleri Enstitüsü* , 247.
- Sasmaz, M., Işıl Arslan, E., Obek, E., & Sasmaz, A. (2015). The potential of *Lemna gibba* L. and *Lemna minor* L. to remove Cu, Pb, Zn, and As in gallery water in a mining area in Keban, Turkey. *Journal of Environmental Management* , 246-253.
- Skoog, D., Holler, J., & Nieman, T. (2000). Principios de analisis instrumental. Madrid: Mc Graw Hill.
- Tatar, S., & Öberk, E. (2014). Potential of *Lemna gibba* L. and *Lemna minor* L. for accumulation of Boron from secondary effluents. 332-336.
- Thangavel, P., & Subbhuraam, C. (2004). Phytoextraction: Role of Hyperaccumulators in Metal Contaminated Soils. *Proceedings of the Indian National Science Academy* , 109-130.
- Torres, D., Cumana, A., Torrealba, O., & Posada, D. (2010). Uso del vetiver para la fitorremediación de cromo en lodos residuales de una tenería. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* , 1.

- U.S. E.P.A. (1998). Toxicological review of hexavalent chromium. Washington: U.S. Environmental Protection Agency .
- Valencia, C. (2006). Química del hierro y manganeso en el agua, métodos de remoción. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Valero, A. (2006). Aplicación tecnológica de las macrófitas a la depuración de aguas residuales con la ayuda de microorganismos. *Tecnología y Ciencias del* , 55.
- Vallejo, M., Ledesma, P., Ibañez, C., Aguirre, L., Parada, R., Vallejo, B., et al. (2016). Resistencia a metales pesados, antibióticos y factores de virulencia en cepas de *Enterococcus* aisladas en la provincia del Chubut, Argentina. *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología* , 16-22.
- Vasquez, P., & Marilia, S. (2015). Estimación de la remoción de cromo, hierro y manganeso mediante un humedal artificial utilizando *Eichhornia crassipes*.
- Veliz, E., Guadalupe , J., Fernández, L., & Bataller, M. (2016). Coagulación-floculación, filtración y ozonización de agua residual para reutilización en riego agrícola. *Tecnología y ciencias del agua* , 17-34.
- Vinasco, C. (2011). Documentación para la determinación de Ag, As, Cd, Cr, Pb, y Hg en aguas residuales, pulpas de frutas, y sulfato de aluminio por espectroscopia de absorción atómica en el laboratorio de aguas y alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- W.H.O. (1999). Manganese and its compounds. Atlanta: World Health Organization.
- Watt, M., & Evans, J. (1999). Proteoid Roots. *Physiology and Development. Plant Physiology* , 317-323.
- Zambrano, J. (1974). Las malezas acuáticas. *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)*.
- Zayed, A. (1998). Phytoaccumulation of trace elements by wetlands. *Journal of Environmental* , 715-721.
- Ziegler, P., Adelman, K., Zimmer, S., & Appenroth, K. (2015). Relative in vitro growth rates of duckweeds (Lemnaceae) - the most rapidly growing higher plants. *Plant Biol* , 33-41.

## ANEXOS

## ANEXO 1. Resultados obtenidos de Cromo por espectroscopia de absorción atómica.

ENTREGA DE RESULTADOS		
 <b>LAGSA</b> Laboratorio Agroambiental de Suelos y Aguas	<b>INFORME DE RESULTADOS ANÁLISIS DE AGUAS</b>	CÓDIGO
		ER-FR-05
		VERSION 00
		PAG: 1 DE 1

DATOS DEL CLIENTE		
SOLICITANTE: Javier Quesada Duque	TELÉFONO: 317818352	CIUDAD: Neiva
DIRECCIÓN: NR	EMAIL: javierquesadaduque@gmail.com	

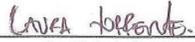
INFORMACIÓN DE LA MUESTRA					
MUESTRA LAB No: 273-17	ID CLIENTE: 1 ppm				
PUNTO DE TOMA: NR	RESPONSABLE: Javier Quesada Duque				
FECHA DE RECEPCIÓN: 06/12/2017	FECHA DE ENTREGA: 19/12/2017				
RESULTADOS					
PARÁMETRO	UNIDADES	METODO ANALITICO	LMD	LMQ	RESULTADO
Cromo	mg/L Cr	Espectrofotométrico AA	0,06	0,2	<0,06

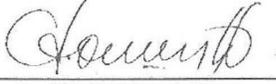
INFORMACIÓN DE LA MUESTRA					
MUESTRA LAB No: 274-17	ID CLIENTE: 2 ppm				
PUNTO DE TOMA: NR	RESPONSABLE: Javier Quesada Duque				
FECHA DE RECEPCIÓN: 06/12/2017	FECHA DE ENTREGA: 19/12/2017				
RESULTADOS					
PARÁMETRO	UNIDADES	METODO ANALITICO	LMD	LMQ	RESULTADO
Cromo	mg/L Cr	Espectrofotométrico AA	0,06	0,2	<0,06

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA					
MUESTRA LAB No: 268-17	ID CLIENTE: Control				
PUNTO DE TOMA: NR	RESPONSABLE: Javier Quesada Duque				
FECHA DE RECEPCIÓN: 06/12/2017	FECHA DE ENTREGA: 19/12/2017				
RESULTADOS					
PARÁMETRO	UNIDADES	METODO ANALITICO	LMD	LMQ	RESULTADO
Cromo	mg/L Cr	Espectrofotométrico AA	0,06	0,2	2,44

(<) Reporte menor al límite de detección del método.

Los resultados corresponden únicamente a las muestras suministradas por el cliente y analizadas en el laboratorio.

  
 Analista Laboratorio  
 Ing Amb. Laura Torrente Trujillo

  
 Director Laboratorio  
 Armando Torrente Trujillo M.Sc. Ph.D

Carrera 5ª No. 21ª -61 B/ Sevilla Neiva - Huila

Telefax 8666848 Cel 3142480137 E-mail. Lagsalaboratorio@gmail.com - Comercial@laboratoriolagsa.com

## ANEXO 2. Resultados obtenidos Hierro por espectroscopia de absorción atómica.

ENTREGA DE RESULTADOS		
 <b>LAGSA</b> Laboratorio Agroambiental de Suelos y Aguas	<b>INFORME DE RESULTADOS ANÁLISIS DE AGUAS</b>	CÓDIGO
		ER-FR-05
		VERSION 00
		PAG: 1 DE 1

DATOS DEL CLIENTE		
SOLICITANTE: Javier Quesada Duque	TELÉFONO: 317818352	CIUDAD: Neiva
DIRECCIÓN: NR	EMAIL: javierquesadaduque@gmail.com	

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA			
MUESTRA LAB No: 266-17	ID CLIENTE: 1 ppm		
PUNTO DE TOMA: NR	RESPONSABLE: Javier Quesada Duque		
FECHA DE RECEPCIÓN: 06/12/2017	FECHA DE ENTREGA: 12/12/2017		
RESULTADOS			
PARÁMETRO	UNIDADES	METODO ANALITICO	RESULTADO
Hierro	mg/L Fe	Espectrofotométrico AA	<0.001

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA			
MUESTRA LAB No: 267-17	ID CLIENTE: 2 ppm		
PUNTO DE TOMA: NR	RESPONSABLE: Javier Quesada Duque		
FECHA DE RECEPCIÓN: 06/12/2017	FECHA DE ENTREGA: 12/12/2017		
RESULTADOS			
PARÁMETRO	UNIDADES	METODO ANALITICO	RESULTADO
Hierro	mg/L Fe	Espectrofotométrico AA	0.0141

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA			
MUESTRA LAB No: 268-17	ID CLIENTE: Control		
PUNTO DE TOMA: NR	RESPONSABLE: Javier Quesada Duque		
FECHA DE RECEPCIÓN: 06/12/2017	FECHA DE ENTREGA: 12/12/2017		
RESULTADOS			
PARÁMETRO	UNIDADES	METODO ANALITICO	RESULTADO
Hierro	mg/L Fe	Espectrofotométrico AA	2.84

(<) Reporte menor al límite de detección del método.

Los resultados corresponden únicamente a las muestras suministradas por el cliente y analizadas en el laboratorio.

*Laura Torrente*

Analista Laboratorio  
Ing Amb. Laura Torrente Trujillo

*Armando*

Director Laboratorio  
Armando Torrente Trujillo M.Sc. Ph.D

Carrera 5ª No. 21ª -61 B/ Sevilla Neiva - Huila

Telefax 8666848 Cel 3142480137 E-mail. Lagslaboratorio@gmail.com - Comercial@laboratoriolagsa.com

### ANEXO 3. Resultados obtenidos de Manganeso por espectroscopia de absorción atómica.

ENTREGA DE RESULTADOS		
 <b>LAGSA</b> Laboratorio Agroambiental de Suelos y Aguas	<b>INFORME DE RESULTADOS ANÁLISIS DE AGUAS</b>	CÓDIGO ER-FR-05
		VERSION 00
		PAG: 1 DE 1

DATOS DEL CLIENTE		
SOLICITANTE: Javier Quesada Duque	TELÉFONO: 317818352	CIUDAD: Neiva
DIRECCIÓN: NR	EMAIL: javierquesadaduque@gmail.com	

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA			
MUESTRA LAB No: 271-17	ID CLIENTE: 1 ppm		
PUNTO DE TOMA: NR	RESPONSABLE: Javier Quesada Duque		
FECHA DE RECEPCIÓN: 06/12/2017	FECHA DE ENTREGA: 12/12/2017		
RESULTADOS			
PARÁMETRO	UNIDADES	METODO ANALITICO	RESULTADO
Manganeso	mg/L Mn	Espectrofotométrico AA	<0,001

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA			
MUESTRA LAB No: 272-17	ID CLIENTE: 2 ppm		
PUNTO DE TOMA: NR	RESPONSABLE: Javier Quesada Duque		
FECHA DE RECEPCIÓN: 06/12/2017	FECHA DE ENTREGA: 12/12/2017		
RESULTADOS			
PARÁMETRO	UNIDADES	METODO ANALITICO	RESULTADO
Manganeso	mg/L Mn	Espectrofotométrico AA	< 0,001

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA			
MUESTRA LAB No: 268-17	ID CLIENTE: Control		
PUNTO DE TOMA: NR	RESPONSABLE: Javier Quesada Duque		
FECHA DE RECEPCIÓN: 06/12/2017	FECHA DE ENTREGA: 12/12/2017		
RESULTADOS			
PARÁMETRO	UNIDADES	METODO ANALITICO	RESULTADO
Manganeso	mg/L Mn	Espectrofotométrico AA	2,54

(<) Reporte menor al límite de detección del método.

Los resultados corresponden únicamente a las muestras suministradas por el cliente y analizadas en el laboratorio.

  
 Analista Laboratorio  
 Ing Amb. Laura Torrente Trujillo

  
 Director Laboratorio  
 Armando Torrente Trujillo M.Sc. Ph.D

## ANEXO 4. Resultados obtenidos de Zinc por espectroscopia de absorción atómica.

ENTREGA DE RESULTADOS		
 <b>LAGSA</b> Laboratorio Agroambiental de Suelos y Aguas	<b>INFORME DE RESULTADOS ANÁLISIS DE AGUAS</b>	CÓDIGO
		ER-FR-05
		VERSION 00
		PAG: 1 DE 1

DATOS DEL CLIENTE		
SOLICITANTE: Javier Quesada Duque	TELÉFONO: 317818352	CIUDAD: Neiva
DIRECCIÓN: NR	EMAIL: javierquesadaduque@gmail.com	

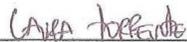
INFORMACIÓN DE LA MUESTRA			
MUESTRA LAB No: 269-17	ID CLIENTE: 1 ppm		
PUNTO DE TOMA: NR	RESPONSABLE: Javier Quesada Duque		
FECHA DE RECEPCIÓN: 06/12/2017	FECHA DE ENTREGA: 12/12/2017		
RESULTADOS			
PARÁMETRO	UNIDADES	METODO ANALITICO	RESULTADO
Zinc	mg/L Zn	Espectrofotométrico AA	<0.001

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA			
MUESTRA LAB No: 270-17	ID CLIENTE: 2 ppm		
PUNTO DE TOMA: NR	RESPONSABLE: Javier Quesada Duque		
FECHA DE RECEPCIÓN: 06/12/2017	FECHA DE ENTREGA: 12/12/2017		
RESULTADOS			
PARÁMETRO	UNIDADES	METODO ANALITICO	RESULTADO
Zinc	mg/L Zn	Espectrofotométrico AA	0,0044

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA			
MUESTRA LAB No: 268-17	ID CLIENTE: Control		
PUNTO DE TOMA: NR	RESPONSABLE: Javier Quesada Duque		
FECHA DE RECEPCIÓN: 06/12/2017	FECHA DE ENTREGA: 12/12/2017		
RESULTADOS			
PARÁMETRO	UNIDADES	METODO ANALITICO	RESULTADO
Zinc	mg/L Zn	Espectrofotométrico AA	2,46

(<) Reporte menor al límite de detección del método.

Los resultados corresponden únicamente a las muestras suministradas por el cliente y analizadas en el laboratorio.



Analista Laboratorio  
Ing Amb. Laura Torrente Trujillo

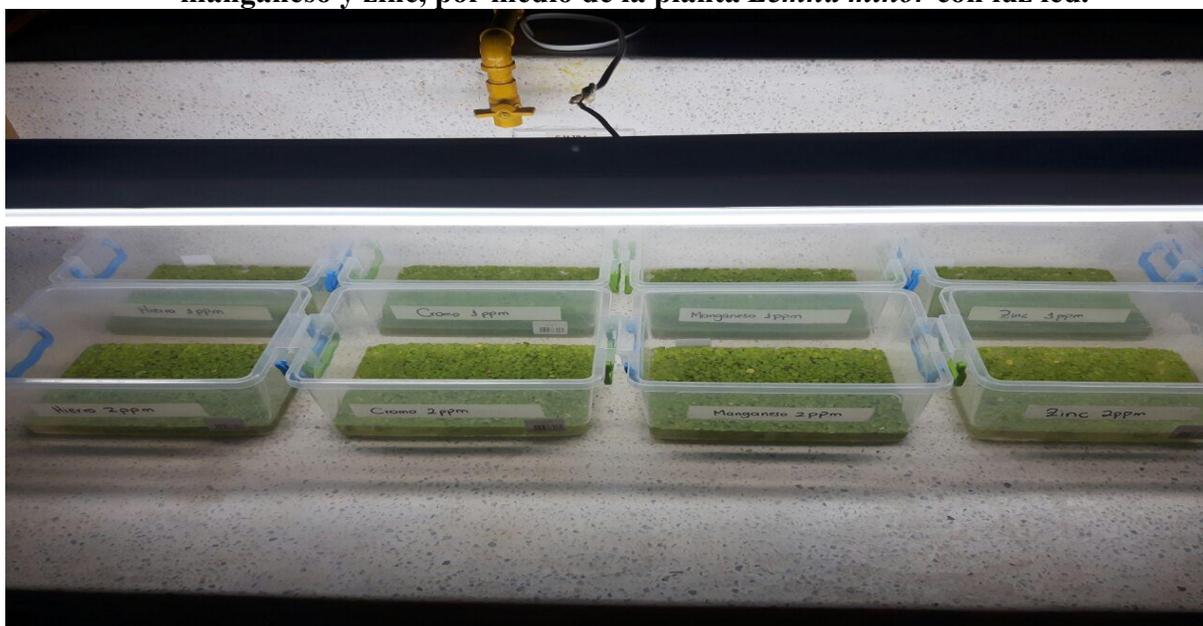


Director Laboratorio  
Armando Torrente Trujillo M.Sc. Ph.D

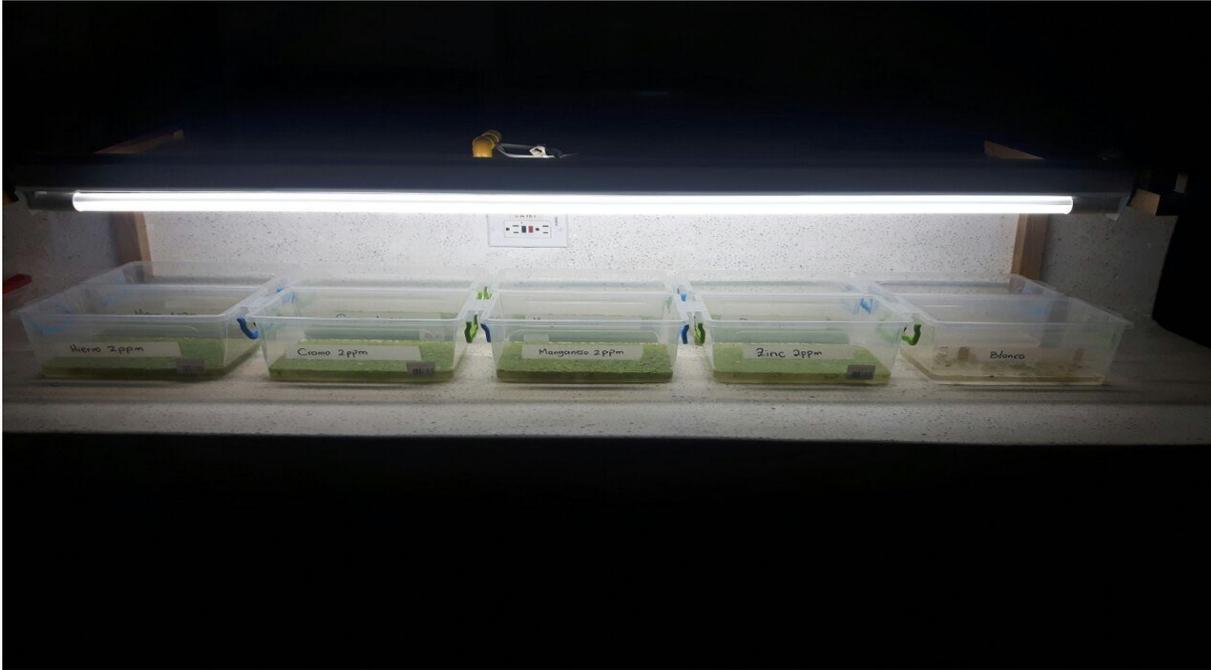
**ANEXO 5. Proceso de fitorremediación de los metales pesados: cromo, hierro, manganeso y zinc, por medio de la planta *Lemna minor* con luz natural.**



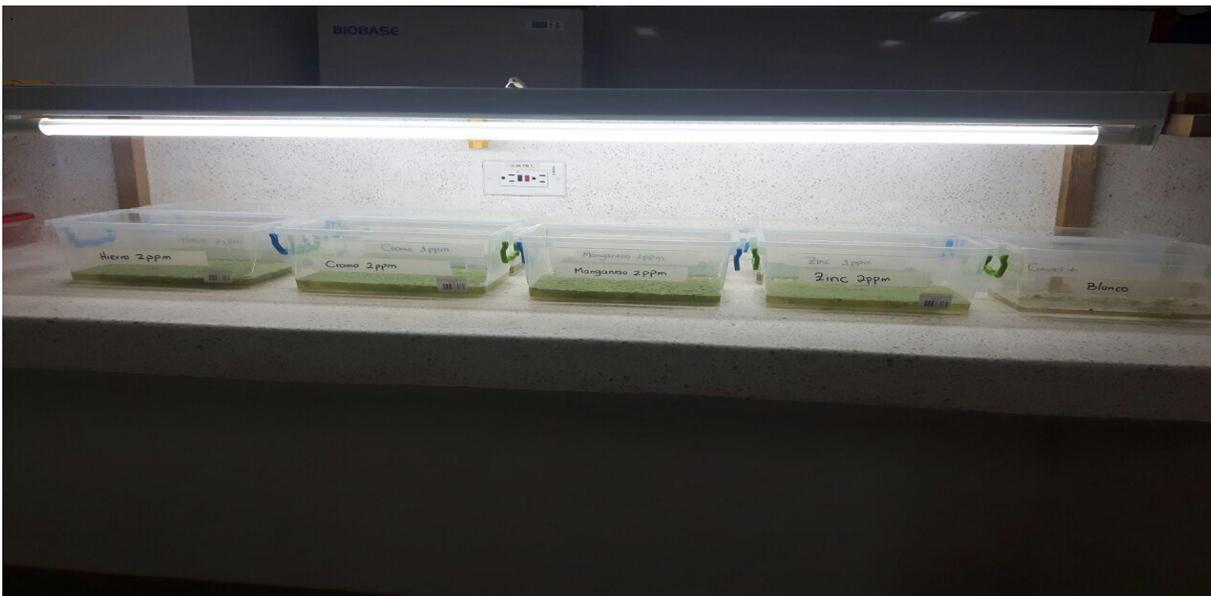
**ANEXO 6. Proceso de fitorremediación de los metales pesados: cromo, hierro, manganeso y zinc, por medio de la planta *Lemna minor* con luz led.**



**ANEXO 7. Proceso de fitorremediación de los metales pesados: cromo, hierro, manganeso y zinc, por medio de la planta *Lemna minor* con luz led.**



**ANEXO 8. Proceso de fitorremediación de los metales pesados: cromo, hierro, manganeso y zinc, por medio de la planta *Lemna minor* con luz led.**



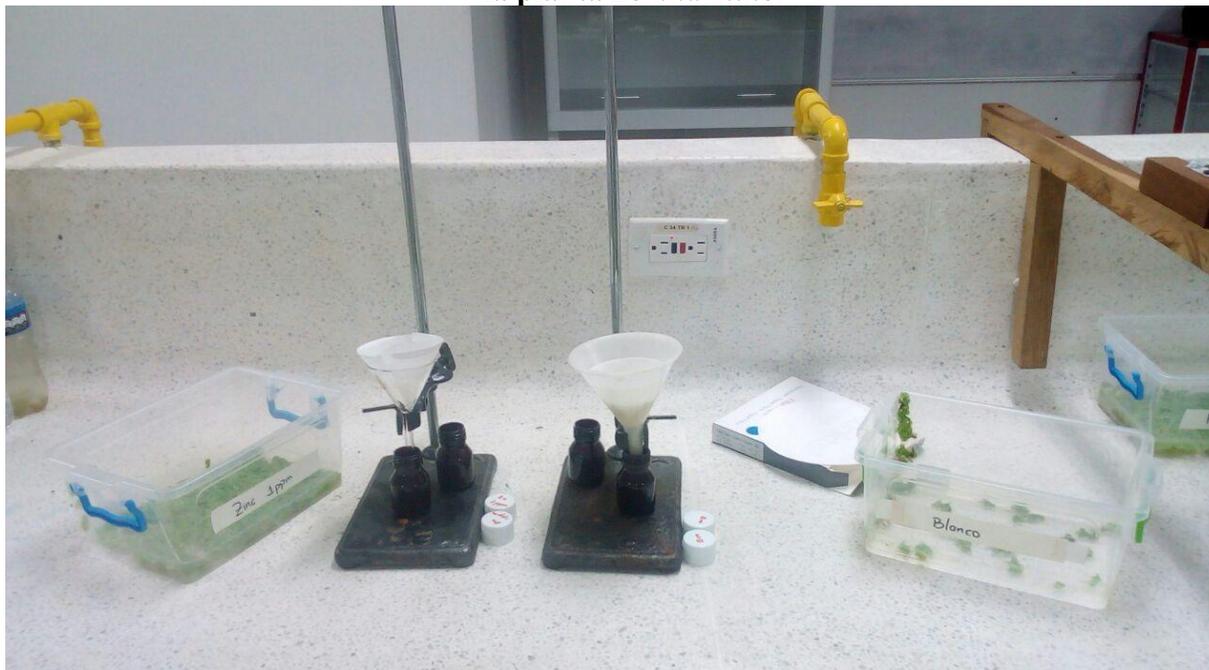
**ANEXO 9. Proceso de fitorremediación de los metales pesados: cromo, hierro, manganeso y zinc, por medio de la planta *Lemna minor* con luz led.**



**ANEXO 10. Proceso de filtración del agua después de 7 días de fitorremediación con la planta *Lemna minor***



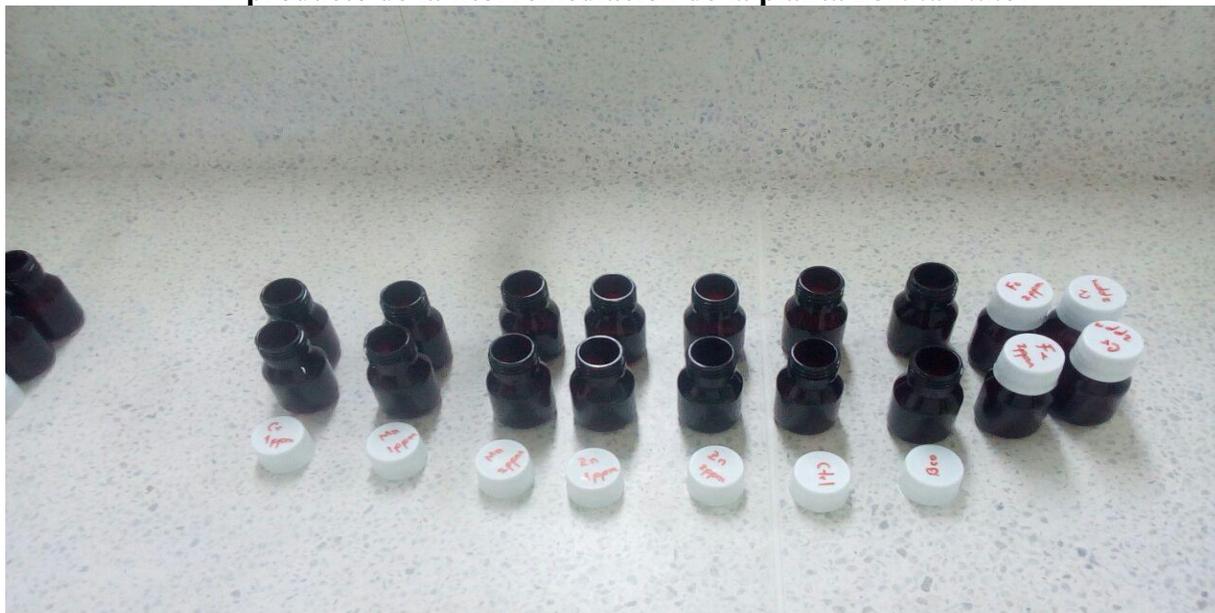
**ANEXO 11. Proceso de filtración del agua después de 7 días de fitorremediación con la planta *Lemna minor***



**ANEXO 12. Proceso de filtración del agua después de 7 días de fitorremediación con la planta *Lemna minor***



**ANEXO 13. Recipientes plásticos de color ámbar para transportar 10 mL el agua producto de la fitorremediación de la planta *Lemna minor***



**ANEXO 14. Recipientes plásticos de color ámbar para transportar 10 mL el agua producto de la fitorremediación de la planta *Lemna minor***

