

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD BIOACUMULADORA DE MERCURIO
PROVENIENTE DE VERTIMIENTOS DE MINAS ARTESANALES DE
BENEFICIO DE ORO POR *Heliconia psittacorum* (Familia: Heliconiaceae) Y
Colocasia esculenta (Familia: Araceae), EN LA MINA EL TAMBORAL,
MUNICIPIO DE SUÁREZ, , DEPARTAMENTO DEL CAUCA.**

**EDWIN HORACIO IMBACHI GAVIRIA
LUIS FERNANDO TUPAZ MANQUILLO.**



**FUNDACIÓN
UNIVERSITARIA
DE POPAYÁN
35 ANIVERSARIO**

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA DE POPAYÁN.
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES
POPAYÁN CAUCA**

2018

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD BIOACUMULADORA DE MERCURIO
PROVENIENTE DE VERTIMIENTOS DE MINAS ARTESANALES DE
BENEFICIO DE ORO POR *Heliconia psittacorum* (Familia: Heliconiaceae) Y
Colocasia esculenta (Familia: Araceae), EN LA MINA EL TAMBORAL,
MUNICIPIO DE SUÁREZ DEPARTAMENTO DEL CAUCA.**

**EDWIN HORACIO IMBACHI GAVIRIA
LUIS FERNANDO TUPAZ MANQUILLO.**

Propuesta Presentada Para Obtener El Título De Ecólogo.

**DIRECTOR (a).
VICTORIA EUGENIA PIZO
Química.**

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA DE POPAYÁN.
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES
POPAYÁN CAUCA**

2018

DEDICATORIA.

Luis Fernando Tupaz Manquillo.

En primero lugar al Dios todo poderoso quien con su amor y sabiduría ha sabido guiarme en la toma de buenas decisiones y me ha ayudado a cumplir este logro tan importante, a mi queridísima madre Patricia Manquillo, que gracias a su apoyo y comprensión, pude concluir con una etapa más en mi vida, de igual manera a mi padre Luis Tupaz, abuelos, tíos, tías, hermana, Gabriela Tupaz y demás que siempre me apoyaron en los momentos en que más lo necesite.

Una dedicatoria muy especial a mi mujer, Karen Alejandra Gallego, quien gracias a su apoyo ilimitado estamos cumpliendo juntos un logro más, a mis dos motores más importantes en mi vida, Nicolás Alejandro Tupaz Gallego y Violeta Tupaz Gallego, quien siempre me impulsaban en los momentos difíciles a salir adelante y por quien luchó día a día para que sean buenas personas.

Edwin Horacio Imbachi Gaviria.

Con un gran amor y cariño la dedico esta meta cumplida a mi familia quienes con su amor y paciencia me han apoyado en todo momento para a cumplir mi sueño de ser un profesional.

En el mismo orden me permito dedicar este fruto de esfuerzo a mi tía Silvia Gavira ya que ella es una parte fundamental en el desarrollo de mi vida profesional, estoy inmensamente agradecido por todos los años en los que me brindó su ayuda incondicional, siendo al mismo tiempo un modelo a seguir para de ahora en adelante ser una mejor versión de mi como persona y como ecólogo profesional.

A dos personas quienes siempre han estado ahí, con sus consejos, amor, dedicación y paciencia apoyándome en cada momento de mi vida, sé que sin ellos no hubiese sido posible tener la oportunidad de realizar mis estudios y lograr culminarlos, a ellos les dedico este triunfo a mi amada madre Nelly Gaviria y mi amado padre Horacio Imbachi .

Mis dos hermanos Hernán Imbachi Gaviria y Freyci Imbachi Gaviria que han sido un apoyo en este proceso de mi formación profesional les dedico esta meta cumplida por su apoyo y estar mi lado siempre.

Finalmente a mis sobrinos Sofía Imbachi, Felipe Itaz y Santiago Imbachi, como muestra de que todo lo que se hace con perseverancia y amor tiene su recompensa para que nunca se rindan y luchen por sus sueños.

AGRADECIMIENTOS.

A Dios todo poderoso, que nos permitió cumplir un logro más y a nuestras familias que nos brindaron su apoyo incondicional durante nuestra formación profesional.

A la Fundación Universitaria de Popayán, quien nos acogió durante 5 años como la segunda casa y en donde se vivieron experiencias inolvidables, además de presentarnos personas maravillosas como amigos y profesores que siempre se quedaran en nuestro corazón.

A los profesores que gracias a sus conocimientos brindados, a su dedicación, comprensión y paciencia, lograron formarnos como profesionales y personas al servicio de la comunidad.

A nuestra directora de tesis Victoria Eugenia Pizo, ingeniera química e instructora del tecnólogo en control ambiental del SENA, quien nos brindó la oportunidad de hacer parte de este proyecto de investigación tan enriquecedor y sin el cual no hubiese sido posible culminar nuestra formación académica – profesional, lo anterior se hizo visible en su dedicación, dirección y apoyo durante el inicio, desarrollo y finalización de este proyecto de investigación.

A Julieth A. Chacón y Daniel Feriz, que además de brindarnos sus conocimientos y su amistad, fueron de mucha ayuda en la solución de incógnitas durante y después del proyecto.

Nos permitimos decir, que este trabajo fue realmente afortunado al ser el resultado de un amplio fruto de ideas y contribuciones de distintas personas excelentes en su trabajo, entre ellas Christian Pabón y Juan David Rojas, que ejercen como tecnólogos en control ambiental del SENA al hacer parte de todo el proceso de investigación, ya que sin ellos gran parte del trabajo no hubiese podido llevarse a cabo, de igualmente al SENA por abrirnos sus puertas y permitirnos ingresar a sus instalaciones, en especial al laboratorio de control ambiental y hacer uso de sus equipos donde se llevó a cabo gran parte de la investigación.

Infinitas gracias a compañeros y amigos que hicieron parte de nuestra formación académica profesional, por tan agradables momentos compartidos en donde a

través del tiempo aprendí un poco de cada uno de ellos; William Noguera, German López, Sofía Suarez, Darly Rodríguez, Juan David Zúñiga, Felipe Cuero, Santiago Oviedo, Luis Carlos Riacos, Iván Parra, Johnny Chicangana, Alejandro Juspian, Herney Liz, Michael Calle Javier Palechor, Wilson Castro.



FUNDACIÓN
UNIVERSITARIA
DE POPAYÁN
35 ANIVERSARIO

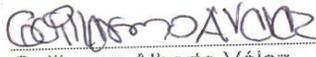
FUNDACION UNIVERSITARIA DE POPAYAN
PROGRAMA DE ECOLOGÍA

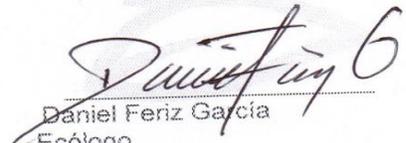
ACTA DE SUSTENTACIÓN PRIVADA

Siendo las 9:00 am. del día 29 de noviembre del 2018, fueron convocados en la Sede los Robles, los jurados: Guillermo Alberto Vélez y Daniel Feriz García, en calidad de pares evaluadores del proyecto de grado denominado, "EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD BIOACOMULADORA DE MERCURIO PROVENIENTE DE VERTIMIENTOS DE MINAS ARTESANALES DE BENEFICIO DE ORO POR *Heliconia psittacorum* (familia: *Heliconiaceae*) y *colocasia esculenta* (Familia: *araceae*), EN LA MINA EL TAMBORAL, MUNICIPIO DE SUAREZ DEPARTAMENTO DEL CAUCA", presentado por el estudiante: Edwin Horacio Imbachi Gaviria y Luis Fernando Tupaz Manquillo.

El trabajo se considera:

Para constancia se firma a los 29 días del mes de noviembre del 2018


Guillermo Alberto Vélez
Ecólogo


Daniel Feriz García
Ecólogo



Sedes administrativas: Claustro San José Calle 5 No. 8-58 - Los Robles Km 8 vía al sur
Sede Norte del Cauca: Calle 4 No. 10-50 Santander de Quichaco

Popayán, Cauca, Colombia
PBX (57-2) 8320225 | www.fup.edu.co | Fundación Universitaria de Popayán



FUNDACIÓN
UNIVERSITARIA
DE POPAYÁN
35 ANIVERSARIO

ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA TRABAJO DE GRADO

FECHA: 30 de noviembre del 2018.

HORA: 10:00 am.

LUGAR: Fundación Universitaria de Popayán, Sede los Robles

Se realizó la Sustentación Pública del Trabajo de Grado denominado :
"EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD BIOACOMULADORA DE MERCURIO
PROVENIENTE DE VERTIMIENTOS DE MINAS ARTESANALES DE BENEFICIO
DE ORO POR *Heliconia psittacorum* (familia: Heliconiaceae) y *colocasia esculenta*
(Familia: araceae), en la MINA EL TAMBORAL, MUNICIPIO DE SUAREZ
DEPARTAMENTO DEL CAUCA", presentado por los estudiantes: Edwin Horacio
Imbachi Gaviria y Luis Fernando Tupaz Manquillo

El trabajo se considera:
APROBADO:

Luisa Fernanda García V
Luisa Fernanda García Varela
Directora del programa de Ecología



Sedes administrativas: Claustro San José Calle 5 No. 8-58 - Los Robles Km 8 vía al sur
Sede Norte del Cauca: Calle 4 No. 10-50 Santander de Quilichao

Popayán, Cauca, Colombia

PBX (57-2) 8320225 | www.fup.edu.co | Fundación Universitaria de Popayán



Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	17
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	22
4. OBJETIVOS	22
4.1 Objetivo general.	22
4.2 Objetivos específicos.	22
5. JUSTIFICACIÓN.	23
6. MARCO TEÓRICO.....	26
6.1 Humedales artificiales.	29
6.2 Humedal artificial de flujo superficial.	30
6.3 Sistemas con macrófitas sumergidas:.....	31
6.4 Humedal artificial de flujo sub superficial	31
6.5 Humedal artificial de flujo vertical	32
7. ANTECEDENTES.	33
9. METODOLOGÍA.....	38
9.1 Materiales Y Métodos.	38
Fase 1.	38
9.2 Revisión del estado del arte.....	38
Fase 2.	39
9.3 Desarrollo experimental del montaje:.....	39
9.4 Construcción y adecuación de las unidades experimentales.....	40
9.6 Selección y siembra de plantas.	42
9.7 Características generales de las plantas estudiadas.	42
9.8 Recolección y homogenización de vertimientos.	43
9.10 Adaptación y Aclimatación.	45
9.11 Fase experimental de contaminación.	45
9.12 Mediciones Vegetales.....	46

Fase 3.....	47
10. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	48
10.1 Implementación del bioensayo de fitorremediación con plantas bioacumuladoras de metales pesados.....	48
10.2 Evaluación de la bioacumulación del mercurio de las plantas Heliconia psittacorum (heliconias) y Colocasia esculenta (orejas de burro) en el proceso de fitorremediación de aguas contaminadas con mercurio.....	50
10.2.1. Análisis ANOVA:.....	53
10.3 Determinación de la eficiencia de bioacumulación de mercurio de las plantas Heliconia psittacorum y Colocasia esculenta en el proceso de fitorremediación.....	54
10.4 medidas de manejo de las plantas usadas para su disposición final.	62
11. DESARROLLO MORFOLÓGICO DE LAS PLANTAS.	64
12. CONCLUSIONES.....	64
13. RECOMENDACIONES	66

Lista de tablas.

<u>Tabla 1: Características generales.</u>	43
<u>Tabla 2: Resultados Descriptivos.</u>	50
<u>Tabla 3: Análisis ANOVA.</u>	53
<u>Tabla 4: Estadísticos descriptivos raíz.</u>	54
<u>Tabla 5: Estadísticos descriptivos tallo.</u>	57
<u>Tabla 6: Estadísticos descriptivos hojas.</u>	61

Lista de imágenes.

<u>Imagen 1:</u> Humedal superficial con macrófitas flotantes.....	30
<u>Imagen 2:</u> Humedales de flujo superficial con macrófitas sumergidas.....	31
<u>Imagen 3:</u> Humedal subsuperficial de flujo horizontal.....	32
<u>Imagen 4:</u> Humedal subsuperficial de flujo vertical.....	32
<u>Imagen 5:</u> Zona de recolección de las muestras.....	37
<u>Imagen 6:</u> Construcción de invernadero.....	39
<u>Imagen 7:</u> Construcción de humedales artificiales. . ¡Error! Marcador no definido.	
<u>Imagen 8:</u> Unidades experimentales	41
<u>Imagen 9:</u> Selección de plantas.....	42
<u>Imagen 10:</u> Toma de muestras.....	44
<u>Imagen 11:</u> Homogenización de muestras..... ¡Error! Marcador no definido.	
<u>Imagen 12:</u> Adaptación de plantas a los humedales.....	45
<u>Imagen 13:</u> Invernadero.....	46
<u>Imagen 14:</u> Humedales artificiales.....	49
<u>Imagen 15:</u> Acumulación de mercurio en plantas.....	51
<u>Imagen 16:</u> Concentración de Hg en raíz.....	56
<u>Imagen 17:</u> Concentración Hg tallo.....	59
<u>Imagen 18:</u> Concentración de Hg en hojas.....	62

Listado De Anexos.

<u>Anexo 1: Materiales De Construcción.</u>	41
<u>Anexo 2: Mina el Tamboral, Suarez-Cauca.</u>	74
<u>Anexo 3: Desarrollo morfológico de las plantas.</u>	73
<u>Anexos 4: Sedimentadores Mina el Tamboral</u>	74
<u>Anexos 5: Sedimentador Mina el Tamboral</u>	75
<u>Anexos 6: Recolección de Vertimientos.</u>	75
<u>Anexos 7: Laboratorio De Muestras Vegetales Para El Análisis De Mercurio.</u>	76
<u>Anexos 8: Muestras liquidas para análisis de Hg.</u>	77

RESUMEN.

Siendo el departamento del Cauca una región de alta actividad minera, es importante fomentar el estudio y la aplicación de biotecnologías ambientales como la fitorremediación, ya que estos métodos son amigables con el medio ambiente, económicos y con buenos resultados. El principal objetivo de este estudio, es determinar la capacidad bioacumuladora de mercurio en *Heliconia psittacorum* y *Colocasia esculenta*, en donde se evaluó la concentración del mercurio (Hg) en las plantas y se determinó en qué parte de ellas lo almacenan; para esta investigación se utilizaron vertimientos de agua de una mina artesanal de beneficio de oro, dichos vertimientos se llevaron al sitio de estudio y mediante diferentes montajes experimentales se llevó a cabo la investigación, se utilizaron materiales como bidones, tarros plásticos, grava, tubos de PVC, llaves hidráulicas que permitieron elaborar un ambiente similar al que las especies utilizadas se pueden encontrar, las plantas estuvieron expuestas a los vertimientos por 8 meses; según los resultados obtenidos, la *Colocasia esculenta* fue la planta que mayor desarrollo morfológico tuvo, esta especie utilizó la rizofiltración como método para absorber y acumular el mercurio; los niveles de acumulación varían según las plantas, por ejemplo, la *Heliconia psittacorum* tuvo un rendimiento significativo hasta un 50% de contaminación, que equivale a un 0,85 µg/L de aguas contaminadas con mercurio, de ahí en adelante activaron un mecanismo de defensa, que se vio reflejado en cuanto al crecimiento de la planta en donde la altura de estas no superó los 18 cm, a comparación de la *Colocasia esculenta* en donde su crecimiento fue constante y algunas plantas alcanzaron una altura de 40 cm. Las diferencias significativas entre las concentraciones de mercurio fueron mayores a ($P > 0.05$), lo que nos permite identificar una similitud en la acumulación del contaminante (Hg) en las plantas estudiadas, ecológicamente hay una planta que mejor se adaptó y mejor se desarrolló que fue la *Colocasia esculenta* lo que llevaría a escoger esta especie para trabajar en procesos de biorremediación de aguas contagiadas por metales pesados.

Palabras claves: Mercurio, Bioacumulación, Desarrollo Morfológico, Rizofiltración, Plantas Hiperacumuladoras.

ABSTRAC

Since the Department of Cauca is a region of high mining activity, it is important to promote the study and application of environmental Biotechnologies such as phytoremediation, since these methods are environmentally friendly, economical and with good results. The main objective of this study is to determine the bioaccumulative capacity of mercury in *Heliconia psittacorum* and *colocasia esculenta*, where the concentration of mercury (Hg) in the plants was evaluated and where part of the plants store it was determined.; for this research we used discharge of water from a mine craft for the benefit of gold, such dumping is carried to the study site, and by using different experimental setups we carried out the research, we used materials such as cans, jars, plastics, gravel, PVC pipes, wrenches hydraulic that allowed to develop a similar environment to which the species can be found, the plants were exposed to the discharge for 8 months; according to the results obtained, *esculenta Colocasia* was the plant that had the greatest morphological development, this species used rizofiltration as a method to absorb and accumulate mercury; the levels of accumulation vary according to the plants, for example, the *Heliconia psittacorum* had a significant yield up to 50% of pollution, which is equivalent to 0.85 $\mu\text{g} / \text{L}$ of waters contaminated with mercury, from then on they activated a defense mechanism, which was reflected in the growth of the plant where the height of these did not exceed 18 cm, compared to the sculpted *Colocasia* where its growth was constant and some plants reached a height of 40 cm. The significant differences between mercury concentrations were greater than ($P>0.05$), which allows us to identify a similarity in the accumulation of the pollutant (Hg) in the studied plants, ecologically there is a plant that best adapted and better developed that it was *Colocasia esculenta* that would lead us to choose this species to work in processes of bioremediation of waters infected by heavy metals.

1. INTRODUCCIÓN.

Los metales pesados como el mercurio, son un problema creciente de contaminación a nivel mundial, dicho contaminante se puede encontrar en diferentes estados y ambientes, como en el suelo, aire y agua, además, dicho elemento tiene la facultad de acumularse en la cadena alimenticia de diferentes especies¹, empezando por las plantas, para pasar luego a los animales y finalizando en el ser humano. El mercurio es uno de los contaminantes más estudiados por su alta toxicidad y puede llegar a los suelos por medios naturales o antropogénicos como la minería².

La pequeña y mediana minería en Colombia utiliza la amalgamación del oro como proceso para su extracción de las rocas que lo contienen, una vez formada la amalgama oro-mercurio es calentado y el mercurio elemental evaporado, que posteriormente es inhalado por los mineros en diferentes etapas de la extracción aurífera, afectando la salud de dicha población³. No solo afecta la salud humana, si no que contribuye a la contaminación ambiental de la región, provocando enfermedades y muertes a especies de fauna y flora presentes en dicha zona⁴.

El distrito minero del Municipio de Suarez en el departamento del Cauca, se encuentra localizado entre las zonas de la cabecera municipal, Maravelez, Pasobobo, Tamboral, La Estrella, Sanfrancisco entre otros a lo largo de los cauces

¹ BAPTISTA, Gilberto. y SICILIANO, Salvatore. Biomagnificación De Mercurio En La Cadena Trófica Del Delfín Moteado Del Atlántico (*Stenella Frontalis*), Usando El Isótopo Estable De Nitrógeno Como Marcador Ecológico. Agosto, 2017. Vol. 52. No. 2., p.14-17.

² VIDAL, J. (15 de septiembre de 2016). Capacidad Del Guarumo (*Cecropia Peltata*) Como Planta Fitorremediadora De Suelos Contaminados Con Mercurio .Universidad Estatal Del Caribe. Obtenido de <http://190.242.62.234:8080/jspui/bitstream/11227/921/1/Proyecto%20de%20grado.pdf>.

³ OLIVERO, J. (9 de septiembre de 2016). Efectos De La Minería En Colombia Sobre La Salud Humana. Obtenido de http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/forum_topic/3655/files/efectos_mineria_colombia_sobre_salud_humana.pdf.

⁴ GALVES, J. (10 de septiembre de 2016). EL MERCURIO EN MINERÍA ARTESANAL: IMPACTO AMBIENTAL DEL MERCURIO. Obtenido de http://geco.mineroartesanal.com/tiki-download_wiki_attachment.php?attId=311.

del río Cauca y Ovejas en el municipio de Suárez, albergando una población aproximada de 16.000 personas, de las cuales cerca de 4.000 depende de las actividades mineras. En las zonas de explotación se extrae oro filoniano con laboreos mineros bajo tierra, cuyo material explotado es sometido a trituración y molienda. En este primer paso se libera oro nativo y se genera desechos sólidos como arenas y lodos, que en algunos sectores se acumulan o son arrojados a las fuentes de agua en la mayor parte de las explotaciones.

Las arenas acumuladas son sometidas a procesos de amalgamación y cianuración, este proceso puede extraer hasta 5 gr/ton, como es evidente existen altísimas pérdidas en proceso donde cerca del 55% del oro se va en las arenas y lodos, dichas arenas pueden registrar valores finales de hasta 4 gr/ton.⁵

Cabe resaltar que altas concentraciones de mercurio en el ser humano, puede alterar el sistema nervioso e inmunitario, el aparato digestivo, la piel, los pulmones, los riñones y los ojos⁶, siendo así un contaminante letal para el ser humano, es por ello que una alternativa de solución para esta problemática es la fitorremediación, técnica que aprovecha la capacidad de algunas plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatizar o estabilizar contaminantes como metales pesados, por lo anterior se hace uso de procesos de bioacumulación que consiste en la acumulación de metales pesados en sus tejidos. En la fitorremediación, las especies seleccionadas se basan principalmente en su potencial fisiológico, como por ejemplo la capacidad de tolerancia y similitud de sustancias tóxicas, por sus tasas de crecimiento y su habilidad para bioacumular y degradar contaminantes del medio⁷. Es de gran importancia identificar y aplicar métodos de fitorremediación,

⁵ LOPEZ AFRICANO, Pedro Ernesto. y APRAEZ, Néstor. Hacia Una Producción Más Limpia En La Minería. Programa Para Minimizar La Contaminación Generada Por La Minería En El Sur Y Occidente Colombiano. Valle Del Cauca.: Cars. 2014. 88p.

⁶ O M G, Organización Mundial Para La Salud. Mercurio Y La Salud. [EN LINEA]. Departamento De Salud Pública, Medio Ambiente Y Determinantes Sociales De La Salud. 2017. [Citado en 28 de noviembre de 2018]. Disponible en internet: <<http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>>

⁷ SUAREZ, K. (15 de septiembre de 2016). EVALUACIÓN DE LAS RESPUESTAS FISIOLÓGICAS DE ESPECIES VEGETALES TROPICALES Y SU USO EN LA BIORREMEDIACIÓN Y TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE RELLENOS SANITARIOS. .Universidad De La Amazonia, 2010.

que ayuden a la remoción y degradación de metales pesados en zonas de influencia de mineras, utilizando metodologías ecológicas, eficientes y de bajo costo, que ayuden a solucionar problemas de contaminación por actividades mineras.

Se ha usado una gran variedad de especies vegetales para la descontaminación, y se sabe que muchas plantas son útiles para la remoción de metales pesados, sin embargo, no hay información precisa que nos indique realmente que cantidad de mercurio absorben y en que parte de la planta lo almacenan, es por ello que se ve la necesidad de saber la capacidad bioacumuladora de mercurio en *Heliconia psittacorum* (heliconias) y *Colocasia esculenta* (orejas de burro) y donde lo acumula, para posteriormente dar alternativas de manejo para su disposición final.

La presente investigación tiene como objetivo evaluar la bioacumulación en *Heliconia psittacorum* (heliconias) y *Colocasia esculenta* en el proceso de fitorremediación, utilizando vertimientos de minas de beneficio de oro provenientes de diferentes municipios del departamento del Cauca.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La minería es la actividad económica mediante la cual se extraen selectivamente de la corteza terrestre diferentes tipos de minerales que son de uso para la producción de materiales empleados por las sociedades modernas y esenciales en el diario vivir. En la actualidad se conocen dos tipos de minería; la industrial y la artesanal, que pueden ser de corto y largo plazo, las cuales han traído grandes problemas ambientales a nivel mundial y nacional⁸.

En el suroccidente Colombiano se encuentra el departamento del Cauca, que tiene considerables reservas de oro en diferentes municipios, en donde la principal actividad económica de la mayoría de estos es la minería aurífera, la cual está causando graves impactos, generando contaminación en el cauce de los ríos y llevando a una muerte lenta de fauna y flora presentes en él, además, originando enfermedades a las personas directa e indirectamente involucradas en dicha actividad⁹. Las fuentes hídricas de la región, son utilizadas como fuente de abastecimiento de agua potable por sus habitantes, este es el caso del río Ovejas y el río Cauca en el municipio de Suarez, en donde el sistema de acueducto de agua potable es abastecido por estos dos importantes ríos. El tratamiento que se hace en los acueductos no elimina por completo el mercurio, llegando con facilidad a las viviendas del municipio anteriormente mencionado, aumentando el riesgo de enfermedades o intoxicaciones por mercurio. Esto hace que se necesite una estrategia de descontaminación que permita la retención de dichos metales y mejore la calidad del agua de las áreas de influencia, buscando así, diferentes alternativas de remoción de contaminantes en el medio de forma natural y a bajo costo, disminuyendo el potencial de exposición de tóxicos a la salud humana. Por este motivo se han desarrollado en el mundo diferentes estrategias para mejorar la

⁸ MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS Y FUNDACIÓN PARA EL DESARROLLO DEL QUINDÍO. (16 de septiembre de 2016). CARTILLA MINERA Obtenido de:

http://www.simco.gov.co/Portals/0/archivos/Cartilla_Mineria.pdf.

⁹ ESTUDIO CRIMINOLÓGICO ECRIM No 001, Minería ilegal en el Cauca. (23 de agosto de 2018) Obtenido de <https://policia.gov.co/file/41219/download?token=pZkeNXFJ>.

calidad del agua como por ejemplo la fitorremediación, la cual incorpora los agentes presentes en el agua dentro de la biomasa vegetal¹⁰.

Si bien con la fitorremediación se pueden extraer del medio (suelo, aire y agua) diferentes contaminantes utilizando una gran variedad especies de plantas, es importante saber que procesos hacen estas en sus organismos para contener dichas toxinas, en donde lo almacenan, cual es la cantidad que soportan y cuál es el tiempo en que estas plantas lo almacenan en sus órganos para así determinar variables en cuanto a cantidades, tiempo y lugar de acumulación en cada una de las plantas estudiadas que nos permitirán determinar el comportamiento del contaminante en las diferentes cadenas tróficas.¹¹

Los estudios realizados por algunos autores como por ejemplo I. López-Tejedor, Hiver M. Pérez y Marcela P. Argumedo, son trabajos que han estudiado la acumulación de mercurio en una sola planta, en donde no se pueden comparar los resultados entre especies, no se puede saber que especie acumula más mercurio que la otra y las cantidades que estas podrían soportar.

El uso inadecuado del mercurio (Hg) en el proceso de extracción del oro, nos lleva a un sin número de problemas relacionado con dicha actividad, afectando drásticamente la salud humana y la salud ecosistémica, actuando no solo en su área de influencia, si no, en un rango mucho más amplio, ya que este metal tiene la facilidad de presentarse en todas sus fases y lo más grave es la posibilidad de bioacumularse en cada organismos vivo del sistema o red trófica.

¹⁰ APOYO A PROYECTOS DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA EN MINERÍA PARA LOS DISTRITOS MINEROS DEL CAUCA, Evaluación minero-ambiental del distrito minero de Suarez. (23 de agosto de 2018) obtenido de <http://crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/mineria/MINERIA%20SUAREZ/MINERALIZACION%20Suarez.pdf>

¹¹ POSADA, Martha Isabel. y ARROYAVE, María Del Pilar. Efectos Del Mercurio Sobre Algunas Plantas Tropicales. En: Escuela De Ingeniería Ambiental. Julio, 2006. Vol. 6. No. 18., p.12-22.

3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Las especies *Heliconia psittacorum* (Heliconias) y *Colocasia esculenta* (Orejas de burro) tienen diferencias en la capacidad de bioacumular mercurio producto de la extracción de oro por minería aurífera?

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general.

- Comparar la capacidad bioacumuladora de la *Heliconia psittacorum* (heliconias) y *Colocasia esculenta* (orejas de burro) en el proceso de fitorremediación de aguas contaminadas con mercurio por minería aurífera.

4.2 Objetivos específicos.

- Implementar un bioensayo de fitorremediación con plantas bioacumuladoras de metales pesados.
- Evaluar la concentración del mercurio de las plantas *Heliconia psittacorum* (heliconias) y *Colocasia esculenta* (orejas de burro) en el proceso de fitorremediación de aguas contaminadas con mercurio.
- Determinar la eficiencia de bioacumulación de mercurio de las plantas *Heliconia psittacorum* y *Colocasia esculenta* en el proceso de fitorremediación.
- Proponer medidas de manejo de las plantas usadas para su disposición final.

5. JUSTIFICACIÓN.

La contaminación de fuentes hídricas por metales pesados como el mercurio, determinan una problemática en el proceso productivo de la minería, ya que este es el insumo utilizado para la extracción del oro dentro del mineral, el mercurio se libera en diferentes formas y genera un aumento permisivo en el límite de legislación ambiental¹².

Una estrategia de bajo costo que se ha estudiado, es el tratamiento por fitorremediación con plantas biocumuladoras,¹³ como es el caso de *Heliconia psittacorum* (Heliconias) y *Colocasia esculenta* (Orejas de Burro) que según estudios ya realizados, son plantas que se han utilizado para este tipo de estrategias con buenos resultados y a muy bajo costo¹⁴.

La población directamente beneficiada corresponde a un aproximado de 16.000 personas, de las cuales cerca de 4.000 dependen de las actividades mineras¹⁵.

Por medio de la fitorremediación y la bioacumulación de mercurio en *Heliconia psittacorum* (Heliconias) y *Colocasia esculenta* (Orejas de Burro), lo que se pretende es brindar información de las diferentes técnicas utilizadas, sin la necesidad de utilizar químicos que muchas veces dan soluciones inmediatas pero con el tiempo van a tener consecuencias tanto para la salud humana como para el ambiente. La fitorremediación es una alternativa ya reconocida mundialmente para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados. El mercurio que se encuentra en las aguas residuales de la minería del oro puede ser absorbido por plantas de manera

12 DIAZ, Arriaga. Mercurio En La Minería Del Oro: Impacto En Las Fuentes Hídricas Destinadas Para Consumo Humano. En: Salud Pública. Septiembre, 2014. Vol. 16. No. 6., p.12-16.

¹³SEPULVEDA ASPRIELLA, Niza Inés. Desarrollo De Un Protocolo Para La Rizofiltración De Efluentes Contaminados Con Mercurio Mediante La Aplicación De Filtros Vegetales Con La Especie Vetiver. Magister En Desarrollo Sostenible Y Medio Ambiente. Manizales.: Universidad De Manizales Facultad De Ciencias Contables Económicas Y Administrativas Maestría En Desarrollo Sostenible Y Medio Ambiente.

14 GONZALES RAMIREZ, Cesar Abelardo. y VILLAGOMEZ IBARRA, José Roberto. Agroecosistemas Tropicales Y Subtropicales. En: Fitorremediación Una Alternativa Para Eliminar Contaminación. Mayo, 2011. Vol. 14. No. 4., p.597-612.

15 Departamento Administrativo Nacional De Estadística (DANE) (3 de noviembre de 2016). Obtenido de <http://www.dane.gov.co/>.

que puedan ser asimilados y descompuestos en elementos no dañinos para la salud y el ambiente. La importancia ecológica recae en que se pueden aprovechar los recursos biológicos como estas plantas que tienen la capacidad de precipitar, absorber o descomponer contaminantes entre los que se encuentra este metal ya que se pretende mitigar los afectos ocasionados por la utilización del mercurio en el sistema hídrico, con el fin de ayudar a disminuir o reducir la contaminación del ambiente y la salud de la población sobre la cual esta investigación aportara avances relevantes para la implementación de esta técnica en otros tipos de minería tanto a nivel local como nacional¹⁶.

Muchas plantas actúan como bioindicadores de la presencia de un metal pesado en el medio por retenerlo selectivamente, mientras otras se comportan como bioacumuladoras del metal pesado al tolerar su presencia y acumularlo en su estructura, dando paso a la bioconcentración a través de la cadena trófica. En el proceso de la contaminación por los metales pesados, las plantas tienen el protagonismo, ya que son la puerta de entrada y acumulación de ellos en los demás seres vivos. Esta contaminación vegetal alcanza a los animales y, en definitiva, al propio hombre, el cual, en la mayoría de los casos, constituye la causa de la producción o incremento de esta contaminación¹⁷; es por ello que el saber cuánto acumulan las plantas, en dónde lo almacenan y el tiempo de retención de los mismos, nos instruye en la replicación de estos métodos en futuros estudios a escalas ya reales.

Al utilizar dos especies de plantas diferentes y contaminándolas de igual forma, se pueden hacer comparaciones que nos indican cuales son las cantidades del contaminante que puede soportar una planta respecto a la otra, indicando los límites máximos permisivos que una planta puede soportar, así, dependiendo de las

16 KIDD, P & BECERRA, C. (15 de septiembre de 2016). APLICACIÓN DE PLANTAS HIPERACUMULADORAS DE NÍQUEL EN LA FITOEXTRACCIÓN NATURAL: EL GÉNERO *Alyssum l.* .Ecosistemas; Revista Científica Y Técnica De Ecología Y Medio Ambiente. Obtenido de:

<http://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/viewFile/126/123>.

¹⁷ POSADA, Martha Isabel. En: Efectos Del Mercurio Sobre Algunas Plantas Tropicales. Julio, 2016. Vol. 6. No. 15., p.57-67.

cantidades del contaminante que se viertan al medio, se podrá escoger la planta adecuada para los procesos de biorremediación.

Es importante resaltar que nuestro proyecto de grado, hizo parte de un proyecto que realizo el SENA en convenio número 469 de 2015, con la Corporación Autónoma Regional del Cauca CRC Gobernación del Departamento del Cauca.

Nuestra vinculación y rango de acción como tal en el proyecto, se basó en el estudio de la bioacumulación de las plantas anteriormente mencionadas, la recolección, transporte de los vertimientos en la mina seleccionada, apoyo en el desarrollo de los montajes experimentales (construcción), operación de la unidad, obtener las muestras para su análisis en el laboratorio, elaboración del documento final y demás, son actividades que desempeñamos durante el transcurso del proyecto.

6. MARCO TEÓRICO.

Generalidades.

La fitorremediación es una técnica que ha sido utilizada en la acumulación y/o bioacumulación de diferentes elementos inorgánicos en especial los metales pesados debido a la gran contaminación que estos ocasionan al medio ambiente y al ser humano, dicho proceso está tomando cada vez más fuerza por ser un procedimiento ecológico, económico y de fácil manejo, aunque faltan muchos más estudios que nos permitan ser base para nuevos proyectos, se está avanzando poco a poco en su investigación e implementación para más adelante obtener datos, procesos y resultados más acertados y reales de acuerdo a la necesidad o a la problemática que se esté presentando.

Con la fitorremediación, lo que se quiere es evaluar la eficiencia de algunas plantas para remover contaminantes de suelos, ríos, caños, quebradas, lagos, entre otros que han sido afectadas por la contaminación de agentes que afectan la vida y la salud de los ecosistemas, de todo su sistema, de los animales y por supuesto del ser humano, hay muchos tipos de fitorremediación y varios métodos, a continuación se deja en conocimiento del lector algunos términos que le ayuden a entender con más facilidad lo que se ha explicado anteriormente.

Fitorremediación.

Desde hace unos años el concepto de usar plantas para remediar la contaminación de los suelos ocasionados por metales pesados, denominado fitorremediación puede involucrar dos procesos: la fitoestabilización y la fitoextracción. La primera reduce a niveles constantes la contaminación del suelo o la biodisponibilidad del metal pesado, mientras que la fitoextracción usa plantas para extraer el contaminante del suelo.

El concepto de usar plantas para acumular metales para su posterior procesamiento es una técnica económicamente atractiva. Otra tecnología prometedora es la

rizofiltración que se puede utilizar para eliminar contaminantes como metales pesados de aguas contaminadas utilizando raíces de plantas¹⁸.

En la fitorremediación, las plantas son seleccionadas principalmente por su potencial Fisiológico, como es el caso de enzimas presentes para tolerar y asimilar sustancias toxica por sus tasas de crecimiento, por la profundidad de sus raíces y su habilidad para bioacumular y/o degradar contaminantes. La vegetación con este tipo de características se conoce como plantas hiper-acumuladoras¹⁹.

Plantas hiperacumuladoras

Las plantas hiperacumuladoras son todas las plantas que absorben metales del suelo donde se encuentran pero en distinto grado, dependiendo de la especie vegetal, y de las características y contenido en metales del suelo. Las plantas hiperacumuladoras generalmente tienen poca biomasa debido a que ellas utilizan más energía en los mecanismos necesarios para adaptarse a las altas concentraciones de metal en sus tejidos. La capacidad de las plantas para bioacumular metales y otros posibles contaminantes varía según la especie vegetal y la naturaleza de los contaminantes²⁰.

Para este tipo de tratamientos y utilizando las diferentes metodologías de trabajo, es muy importante resaltar y nombrar los tipos de montajes experimentales que se pueden utilizar, de acuerdo a la metodología de desarrollo utilizada en el proyecto, seguidamente se nombran los diferentes tipos de humedales que se pueden desarrollar en los procesos de fitorremediación.

¹⁸ LA FITORREMEDIACIÓN: Plantas para tratar la contaminación ambiental, (30 de agosto de 2018), Obtenido de <http://agricultores.com/la-fitorremediacion-plantas-para-tratar-la-contaminacion-ambiental/>.

¹⁹ Peña, Parra, Sánchez y Medina. BIOPROSPECTING OF NATIVE PLANTS FOR THEIR USE IN BIOREMEDIATION PROCESS: HELICONIA PSITTACORUM CASE (HELICONIACEAE). (Diciembre 2013) Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v37n145/v37n145a04.pdf>.

²⁰ EPALZA, Gustavo Alberto. y PATIÑO, Carlos Alberto. Diseño Y Evaluación De Un Sistema Piloto De Descontaminación De Aguas Residuales A Partir De Plantas Hiperacumuladoras. Julio, 2015. Vol. 12. p.8-14.

Bioacumulación.

La bioacumulación consiste en el aumento de la concentración de una especie química en un organismo. Esta es consecuencia, generalmente, de su alimentación. Las sustancias que son susceptibles de bioacumularse pueden experimentar un fenómeno de biomagnificación, es decir, sus concentraciones aumentan progresivamente a lo largo de la cadena trófica. La bioacumulación, por si misma, no tiene por qué ser dañina para un organismo. El problema surge cuando este sucede con sustancias tóxicas. Con respecto a los metales pesados, el único que indiscutiblemente es capaz de bioacumularse es el mercurio ya que no ejerce función alguna de los seres vivo²¹, en ese orden de ideas utilizamos la fitorremediación como fórmula “extractora de dichos metales”.

Bioconcentración:

Por su parte la bioconcentración²² es descrita como el proceso que resulta de la acumulación de un producto químico en un organismo a niveles más altos que los encontrados en su alimento. Esto ocurre cuando un compuesto químico comienza a concentrarse en un porcentaje cada vez mayor en su paso por la cadena trófica. Al final de la cadena alimenticia, entonces, un consumidor de tercer orden puede acumular por medio de su comida una concentración mucho mayor que la presente en un organismo de un nivel inferior en la cadena.

Los pasos de la bioconcentración se describen de la siguiente manera: los productores toman los nutrientes inorgánicos de su ambiente, y debido a que una deficiencia de estos nutrientes puede limitar el crecimiento del productor, los productores harán el mayor esfuerzo para obtenerlos; con frecuencia, gastan considerable energía para incorporar los nutrientes en sus cuerpos, incluso incorporan más de lo necesario en el momento y lo almacenan. El problema se presenta cuando un producto contaminante, como el mercurio, se presenta en el

²¹ NAVARRO, Aviñó. y AGUILAR, Alonso. Aspectos Bioquímicos Y Genéticos De La Tolerancia Y Acumulación De Metales Pesados En Plantas. , 2011. Vol. 16. No. 2., p.115-136.

²² USEPA. (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). (2005). Mercury in medical facilities. [citado 22 julio 2005]. (<http://www.epa.gov/seahome/mercury/src/terms.htm>).

ambiente. Este contaminante se asemeja químicamente a nutrientes inorgánicos esenciales, por lo que son incorporados y almacenados "por error". En este primer paso el contaminante se encuentra en una concentración mayor dentro del productor que en el ambiente²³.

La segunda etapa sucede cuando los organismos productores (planta o alga) pasan a los consumidores en la cadena trófica (alimenticia). Dado que un consumidor (de cualquier nivel) tiene que consumir mucha biomasa del nivel trófico inferior, si esa biomasa contiene el contaminante, éste será consumido en grandes cantidades por el consumidor. Los contaminantes que se bioconcentran tienen otra característica: no solamente son adquiridos por los productores, sino que también son absorbidos y almacenados en los cuerpos de los consumidores. Estos materiales se adquieren por medio de los productores y pasan a la grasa de los consumidores. Si el consumidor es capturado y comido, su grasa es digerida y el contaminante se traslada a la grasa del nuevo consumidor de nivel trófico superior. De esta manera, aumenta la concentración del contaminante en los tejidos grasos de los consumidores. Usualmente los contaminantes solubles en agua no pueden bioconcentrarse de esta manera, debido a que se disuelven en los fluidos corporales del consumidor. Ya que todos los organismos pierden agua, los contaminantes se pierden junto con el agua. Pero la grasa no se pierde.

Al aplicar esto a los ecosistemas acuáticos, se vuelve de vital importancia el estudio de la acumulación de los metales pesados en plantas del trópico, que se encuentran en la base de la cadena trófica como productoras primarias.

6.1 Humedales artificiales.

Los humedales son áreas que se caracterizan por tener un suelo saturado de agua y una comunidad viviente (plantas y animales) adaptados a la vida acuática o a un

²³ MACANO, José Eugenio. Educación Ambiental En La Republica Dominicana. [EN LINEA]. Biodiversidad. 2011. [Citado en 27 de Noviembre de 2018]. Disponible en internet: <<http://www.jmarcano.com/index.html>>

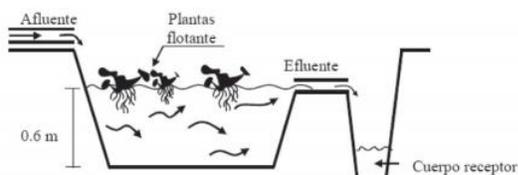
suelo saturado. El término humedal (wetland en inglés) se usa para definir áreas que tienen tres componentes típicos²⁴.

- Presencia de agua: el área permanece inundada permanente o periódicamente con una profundidad menor de un metro.
- Suelos característicos: clasificados como hídricos.
- Vegetación: prevalecen las plantas macrófitas adaptadas a las condiciones hidrológicas y del suelo. Existen dos tipos de humedales artificiales desarrollados para el tratamiento de aguas residuales: los de flujo superficial (FWS – Free Water Surface) y los de flujo subsuperficial (SFS – Sub Surface Flow). A continuación se explicará cada uno de ellos. Humedal artificial de flujo superficial Consiste en canales con la superficie del agua expuesta.

6.2 Humedal artificial de flujo superficial.

Consiste en canales con la superficie del agua expuesta a la atmósfera y el fondo constituido por suelo relativamente impermeable, con una cubierta impermeable, vegetación emergente y niveles de agua poco profundos que oscilan entre 0.1 y 0.6 metros. El tratamiento se produce durante la circulación lenta del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación. Este sistema se puede dividir, de acuerdo con el tipo de macrófitas²⁵.

Imagen 1: Humedal superficial con macrófitas flotantes.



Fuente: (CIEMA, 2005).

²⁴ CIEMA, Tecnología Sostenible Para El Tratamiento De Aguas Residuales. Investigación. 2005. [Citado el 14 de Noviembre de 2016]. Disponible en internet: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/ii-109.pdf>>.

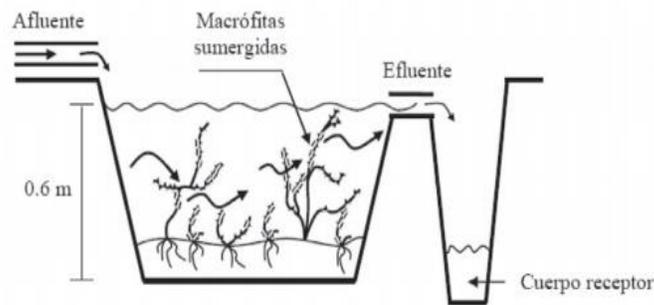
²⁵ Ibid., 22.

Los sistemas con macrófitas flotantes (Imagen 1): son formados por grandes lagunas con bajos niveles de agua y provistas de plantas macrófitas que flotan libremente en la superficie. Sus raíces sumergidas tienen un buen desarrollo fisiológico.

6.3 Sistemas con macrófitas sumergidas:

Compuestos por lagunas con bajo nivel de agua y plantadas con plantas macrófitas (imagen 2) cuyo tejido fotosintético está totalmente sumergido. Estas plantas solo crecen bien en aguas que contienen oxígeno disuelto, por lo cual no se utilizan para aguas residuales con alto contenido de materia orgánica biodegradable ya que la descomposición microbiana provoca condiciones anóxicas.

Imagen 2: Humedales de flujo superficial con macrófitas sumergidas.



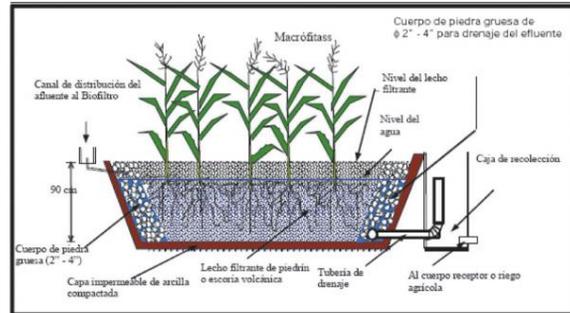
Fuente: (CIEMA, 2005)

6.4 Humedal artificial de flujo sub superficial

Este tipo de sistemas con macrófitas emergentes consiste en un filtro biológico relleno de un medio poroso (por ejemplo piedra volcánica, grava), en el cual las plantas macrófitas se siembran en la superficie del lecho filtrante y las aguas residuales pre tratadas atraviesan de forma horizontal o vertical el lecho filtrante, en estos sistemas el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio granular. Estos humedales se clasifican a su vez en humedales artificiales de flujo

horizontal y humedales artificiales de flujo vertical, según la manera como las aguas residuales pre tratadas atraviesen el lecho filtrante.

Imagen 3: Humedal sub superficial de flujo horizontal.



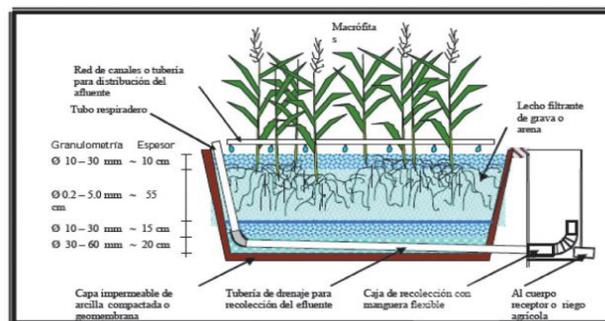
Fuente: (CIEMA, 2005)

Humedales de flujo horizontal. En este tipo de humedal las aguas residuales fluyen lentamente desde la zona de distribución en la entrada de la pila, en una trayectoria horizontal a través del lecho filtrante, hasta la superficie de recolección del efluente²⁶ (imagen 3).

6.5 Humedal artificial de flujo vertical

Aquí las aguas pres tratadas se distribuyen de manera uniforme e intermitente sobre la superficie del lecho filtrante y luego percolan hacia la zona de recolección (imagen 4).

Imagen 4: Humedal sub superficial de flujo vertical.



Fuente: (CIEMA, 2005)

²⁶ Ibid., 22.

7. ANTECEDENTES.

En la actualidad se han adelantado estudios acerca de la utilización de plantas en los procesos de fitorremediación y bioacumulación de contaminantes tales como los realizados por:

Híver M. Pérez-Vargas, Jhon V. Vidal-Durango y José L. Marrugo-Negrete 2014 realizaron una evaluación de la capacidad acumuladora de mercurio del ají (*Capsicum annuum*).

En donde se evaluó la capacidad acumuladora del mercurio por parte de la planta de ají, se tomaron muestras de tejidos (raíces, tallos y hojas) sembradas en dos suelos contaminadas de mercurio y un control, como resultado obtuvieron que las concentraciones de mercurio más representativas estaban en las raíces de las plantas.

Adolfo D. Arenas, Lué-Merú Marcó y Gosmyr Torres 2011, analizaron la Evaluation Of The Plant Lemna Minor For The Bioremediation Of Water Contaminated With Mercury.

Evaluaron la capacidad biorremediadora de Lemna minor en aguas contaminadas con mercurio mediante un diseño experimental de 3 bloques al azar con cinco réplicas: un grupo experimental con 100 g de Lemna, 7,5 L de agua contaminada con Hg (0,13 mgL⁻¹) y solución nutritiva; un grupo Testigo con 100 g de Lemna, 7,5 L de agua y solución nutritiva y un grupo control con mercurio al nivel de 0,13 mgL⁻¹ en agua destilada sin plantas. La eficiencia de remoción de mercurio de la Lemna minor, en 22 días, fue de 30. La planta Lemna minor representa una alternativa para la remoción de mercurio en aguas contaminadas hasta un nivel de 0,13 mg/L.

Fabiola Lango-Reynoso, Cesáreo Landeros-Sánchez and María del Refugio Castañeda-Chávez 2010, analizaron la Bioaccumulation of Cadmium (Cd), Lead (Pb) And Arsenic (As) In Crassostrea Virginica (Gmelin, 1791), From Tamiahua Lagoon System, Veracruz, México.

El objetivo de este estudio fue determinar las concentraciones de Cd, Pb y As en las porciones gónada-sistema digestivo (GSD) y músculo-manto-branquias (MMB) de hembras y machos de ostión en el sistema lagunar de Tamiahua, Veracruz. Se seleccionaron dos sitios de muestreo. Cada muestra consistió de 500 organismos de talla comercial. Las concentraciones de Cd, Pb y As se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica y horno de grafito; el tejido MMB registró las concentraciones más altas, de estos metales con valores medios de 11.77 ± 1.32 , 0.484 ± 0.08 , 4.02 ± 0.56 mg kg⁻¹. El Cd superó los límites permisibles de consumo que establecen las normas sanitarias para moluscos bivalvos y se estima que representa un riesgo para la salud humana.

Peña-Salamanca Enrique J, Madera-Parra Carlos A, Sánchez, Jesús M, Medina-Vásquez Javier 2013, realizaron una Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso *Heliconia psittacorum* (Heliconiaceae).

En dichos estudios realizados con heliconas para evaluar su potencial fitorremediador, se ha logrado demostrar que la especie presenta características adecuadas a las condiciones en los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales, a partir de su capacidad de eliminación de DBO, DQO Y SST, por encima del 70% de remoción sin detrimento de sus propiedades fisiológicas. Los resultados aquí presentados plantean la necesidad de ampliar la evaluación del desempeño de especies nativas frente a la capacidad de tolerancia de las mismas para el manejo del estrés del contaminante.

María Consuelo Jaramillo F. Luisa Fernanda Zapata O. Tatiana Marulanda L realizaron una investigación sobre Fitorremediación de mercurio a partir de *elodea* sp.

En esta investigación se evaluó la capacidad de biorremediación del ion mercurio por la planta macrófita *Elodea* sp. Tallos de 35-36 cm de la planta fueron sometidos a diferentes concentraciones de solución de HgCl₂. Las concentraciones evaluadas fueron de 0,39mg/ml, 1,55mg/ml y de 6,25mg/ml, aunque la planta *Elodea* sp mostró un gran desempeño en las tres soluciones, con la concentración de 1,55mg/ml

obtuvo un porcentaje de remoción del 100%, lo cual lo convierte en las condiciones a las que debe ser removido el mercurio.

Janneth Astrid Cubillos Vargas 2011, realizó una Evaluación de la fitorremediación como alternativa de tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos; Con este proyecto de investigación realizó la evaluación de la aplicabilidad de la fitorremediación como alternativa tecnológica para el tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos (HC) procedente del petróleo. Los humedales construidos con matriz de suelo demostraron remover hidrocarburos totales de petróleo, logrando eficiencias superiores al 50 % en aguas contaminadas con altas concentraciones de estos compuestos. El humedal sin matriz de suelo y plantas sembradas, no mostró tolerancia a los hidrocarburos. En términos de remoción de materia orgánica (DBO5), el humedal con matriz de suelo y plantas (HSSP) sugirió ser el sistema más efectivo, ya que durante el periodo de funcionamiento logró eficiencias de remoción superiores al 92 % ($p < 0.05$).

Raúl Hernando Cortés L. Andrés Mauricio Gómez Sánchez, 2015, analiza los efectos de la coyuntura mundial sobre la estructura y la dinámica de la economía caucana reconsiderando las restricciones geográficas e institucionales del distrito minero de El Tambo-Buenos Aires a la luz de la llamada “maldición de los recursos naturales”. Las conclusiones, entre otras, encuentran que el auge del oro alrededor de la noción de “distrito minero” en el occidente del departamento del Cauca parece debatirse en tres tipos de problemas. El primero, articulado a los choques del mercado mundial, el segundo es un problema de dislocación de lo regional frente al local, y en último lugar, el problema del nivel de desarrollo que evoca una tradición minera del siglo XIX cifrada en la expoliación ecológica, captura de rentas a ultranza y un esquema de gustación política legitimada por el clientelismo y el azar cortoplacista.

Martha Isabel Posada y María del Pilar Arroyave, presentan un artículo sobre “Efectos del mercurio sobre algunas plantas acuáticas tropicales” en donde realizan

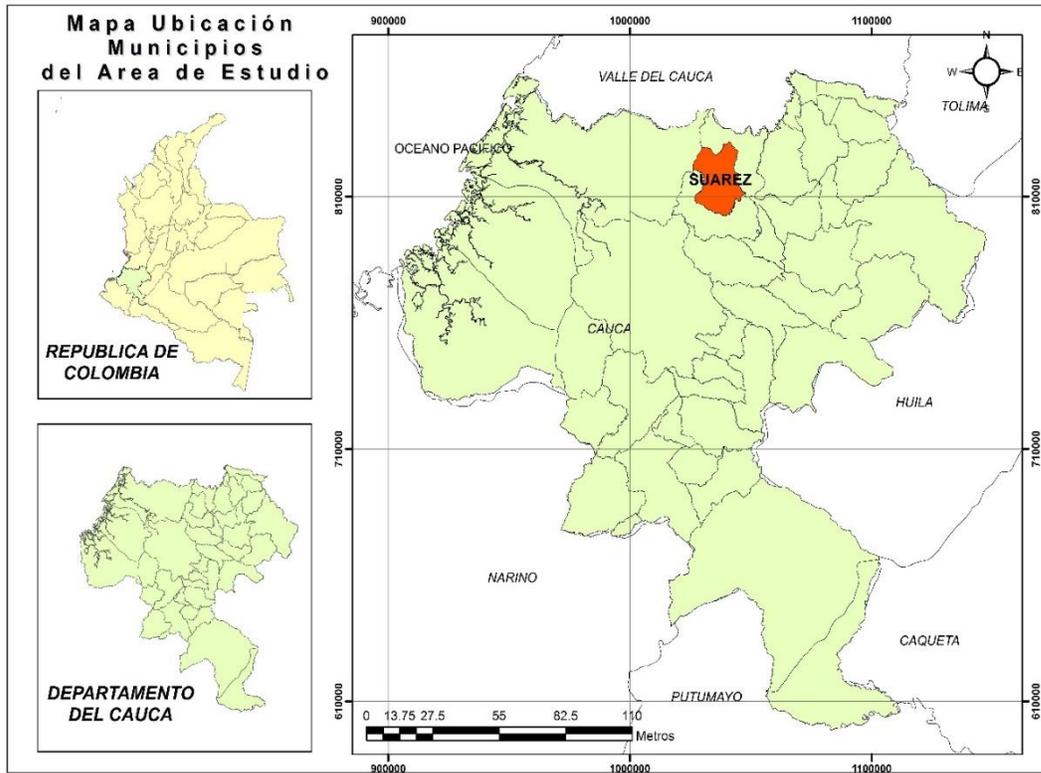
una descripción de los efectos del mercurio sobre algunas plantas acuáticas tropicales y sobre los ecosistemas donde los habitan. Se encontró que la biodisponibilidad del mercurio depende de factores que facilitan la disolución del elemento en el agua. Algunas plantas actúan como bioindicadores de la presencia de este metal en el medio al retenerlo selectivamente; mientras que otras se comportan como bioacumuladoras al tolerar su presencia y acumularlo en su estructura, y pueden dar paso a la bioconcentración a través de la cadena trófica.

I. Lopez Tejedor, M. J. Sierra, J. Rodríguez, R. Milla, hicieron un estudio de la Absorción y Distribución del Mercurio en *Nerium oleander L.* en la Ribera del Río Valdeazogues (Estación de Chillón - Almadén), en donde el principal objetivo de este estudio es determinar la absorción y distribución del mercurio en la edelfa (*Nerium oleander L.*), los resultados muestran que la distribución del mercurio absorbido por *N. oleander* no es homogénea en toda la parte aérea. En general, la concentración es significativamente mayor en las hojas seguida de los tallos y los frutos. Según los resultados, aunque la concentración de mercurio en la planta no es muy elevada, la adelfa presenta una serie de características (alta biomasa, toxicidad, no comestible), que la pueden convertir en una futura candidata como fitoextractora de mercurio, en procesos de descontaminación de suelos.

Marcela P. Argumedo G. Carlos Vergara R. Jhon V. Vidal D. Jose L. Marrugo N; realizaron una Evaluación de la concentración de mercurio en arroz (*Oryza sativa*) crudo y cocido procedente del municipio de San Marcos– Sucre y zona aurífera del municipio de Ayapel – Córdoba, en donde según los resultados obtenidos se presentaron concentraciones bajas de mercurio total y metilmercurio en las muestras de arroz crudo y cocido. Además, fue detectado que el proceso de cocción del alimento disminuye las concentraciones de HgT, en los diferentes tratamientos de tiempo de cocción. Llegando a la conclusión de que los habitantes de los municipios en estudio están expuestos a concentraciones mínimas de mercurio que podrían ser perjudiciales para su salud, debido a la alta ingesta de este cereal en la dieta de las comunidades.

8. ÁREA DE ESTUDIO.

Imagen 5: Zona de recolección de las muestras.



Fuente: Este estudio.

El montaje de las unidades experimentales y el estudio de la evaluación de las respuestas morfológicas de cada uno de los montajes con sus respectivas plantas, se realizó en el departamento del Cauca, municipio de Popayán, en las instalaciones del Sena alto Cauca. El trabajo se realizó en un invernadero provisional, tratando de controlar factores como temperatura, humedad y lluvia, que podrían alterar los resultados obtenidos en los datos tomados en campo y el análisis de las muestras tanto de agua, como de muestras vegetales en el laboratorio.

Los vertimientos utilizados en la contaminación de las plantas, se trajeron de la mina el Tamboral, ubicada en el municipio de Suárez Cauca (Imagen 5), que en el momento de ir a recolectar dichas aguas, era la única mina en la que funcionaba el

tanque filtro que permite atrapar los lodos contaminados con mercurio y no hacen que estos lleguen directamente a la quebrada que pasa a un lado de la mina.

9. METODOLOGÍA.

9.1 Materiales Y Métodos.

Se seleccionó la mina el Tamboral, por presentar las características físicas de su desarenador en uso y buen estado, lo que no sucedía con las otras minas con las cuales se pretendía realizar el estudio, el trabajo se realizó bajo el convenio 469 de la CRC, Sena y Gobernación del Cauca, en el cual se tomaron todos los parámetros fisicoquímicos (pH, temperatura, conductividad, dureza, STD, nitritos, nitratos, presencia de metales pesados.) de los vertimientos, para determinar los antecedentes de la zona.

El proyecto se realizó en tres fases, las cuales se describirán a continuación.

Fase 1.

9.2 Revisión del estado del arte

a. Se realizó la revisión bibliográfica de artículos científicos asociados al tema de fitorremediación y bioacumulación de mercurio y otros metales en plantas, como los realizados por I. López-Tejedor, Hiver M. Pérez y Marcela P. Argumedo.

Fase 2.

9.3 Desarrollo experimental del montaje:

a. Construcción de infraestructura en donde se desarrolló el montaje experimental.

La construcción de la infraestructura, se desarrolló en las instalaciones del Sena alto Cauca, en convenio con los semilleros de investigación Sena-Fup, en la cual con el apoyo de los aprendices de construcción en guaduas y los de control ambiental, (imagen 6) se realizaron actividades como adecuación del terreno, aplanado del lugar, se cubrió con maya ojo de pollo al rededor, la infraestructura se realizó en guaduas y se techo para la protección del montaje experimental.

Imagen 6: Construcción de invernadero.



Fuente: Este estudio.

Una vez construida la infraestructura, se procedió al alistamiento de los materiales que se necesitaban para la construcción del montaje experimental, se realizaron actividades como:

1. Selección y lavado de grava, la cual sirvió como sustrato para la siembra de las plantas.
2. Lavado de bidones y tarros; bidones (en donde se llenaron con los vertimientos de la mina); tarros, en donde se colocó la grava (sustrato) y se sembraron las plántulas.

3. Se cortaron los tubos, se abrieron agujeros en los tarros y bidones, se empalmó la tubería, se llenó con el sustrato y se instaló el montaje como tal.
4. Por último, se procedió a realizar ensayos, para que no hubiese fugas, se corrigieron errores y se dejó listo para la siembra de las plántulas.

9.4 Construcción y adecuación de las unidades experimentales.

Se diseñó con el fin de obtener un factor de tratamiento de dos plantas *Heliconia psittacorum* (heliconias) y *Colocasia esculenta* (orejas de burro), evaluando los vertimientos de agua de una mina artesanal, proveniente de un distrito minero de beneficio de oro con técnica de amalgamación del municipio de Suarez del departamento del Cauca. Se tomó una muestra compuesta, la cual se utilizó para la contaminación de cada uno de los montajes experimentales (6 unidades experimentales y dos control), cada muestra compuesta tuvo 2 montajes con diferentes plantas que son: *Heliconia psittacorum* y *Colocasia esculenta*, y se sembraron 9 plantas por montaje.

Para este estudio se construyeron 8 humedales (imagen 7) mediante instalación hidráulica, las cuales se conectaron al tanque principal, con dimensiones de 1.20 cm de alto y un ancho 60 cm, que se denominó depósito de vertimientos de las minas, que tiene una capacidad de almacenamiento de 125 litros de la muestra compuesta, este se instaló sobre una estructura metálica a una altura de 80 cm de alto, en su parte inferior tiene una llave de plástico con el fin de controlar el flujo de agua, teniendo un TRH de 7 días, dichas llaves se conectaron mediante tubos de PVC, para permitir la llegada del agua a tratar de manera adecuada al humedal artificial, el cual para soporte de las plantas se utilizó grava altamente porosa $\frac{1}{2}$ y $\frac{1}{3}$ de pulgada, está construido sobre macetas plásticas, para que el agua sea distribuida de manera uniforme²⁷.

²⁷ PÉREZ, G & ENCISO, S. (16 de octubre de 2016). DISEÑO HIDRÁULICO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL A NIVEL LABORATORIO Obtenido de http://web.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/memorias/Extenso/TA/EC/TAC-20.pdf

Imagen 7: Unidades experimentales



Fuente: Este estudio.

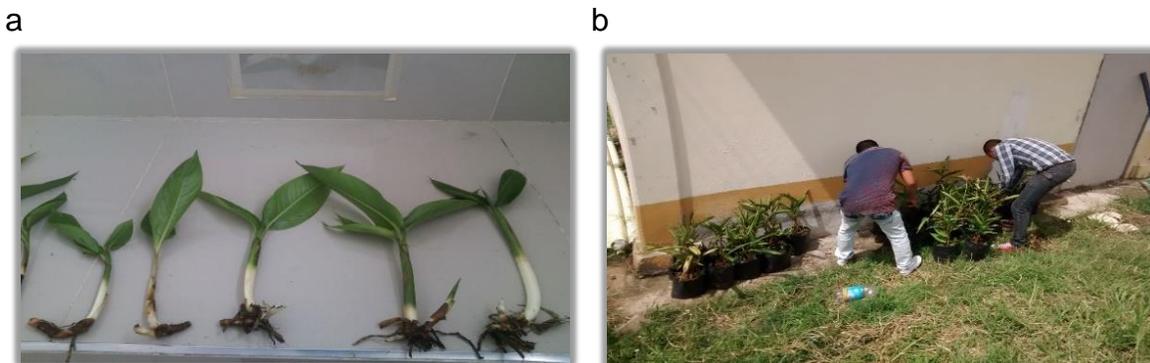
Para la construcción del humedal, se utilizaron los siguientes materiales (Tabla 1).

Tabla 1: Materiales De Construcción.

Materiales	Cantidad
Bidones de 125 litros	8
Tanques rectangulares plásticos 69*47*38.5cm	8
Grava de 1/3 pulgada	1 metro
Grava de 1/2 pulgada	1 metro
Tubos de PVC de 1/2 pulgada	2 tubos de 4 metros cada uno.
Llaves plásticas	8
Codos de 1/2 pulgada	16
Adaptadores machos 1/2 pulgada	16
Adaptadores hembras 1/2 pulgada	16
Silicona industrial	2 tarros
Cinta teflón	2 rollos * 10 metros cada uno.
Pegante para tubos de PVC	1 frasco
Estructura de soporte metálica	8

9.6 Selección y siembra de plantas.

Imagen 7: Selección de plantas. a) Ejemplar de *Heliconia psittacorum*,
b) Selección de *Colocasia esculenta*.



Fuente: Este estudio.

Las especies vegetales seleccionadas para la investigación, fueron el resultado de las investigaciones preliminares como los estudios realizados por Peña-Salamanca Enrique J, Madera-Parra Carlos A, Sánchez, Jesús M, Medina-Vásquez Javier 2013²⁸ y de su buen comportamiento fisiológico en cuanto al desarrollo durante los procesos de intoxicación, se tomó como referencia el trabajo de investigación “efecto en el crecimiento y fisiología en 11 especies vegetales regadas con lixiviado del relleno sanitario el presidente”²⁹, en el cual las especies fueron sometidas a vertimientos reales del relleno sanitario, en donde las plantas con mejores resultados fueron: *Colocasia esculenta* (Oreja de Burro), *Gynerium sagittatum* (Caña Brava), y *Heliconia psittacorum* (Heliconia), lo que permite escoger estas especies para la realización del proyecto de investigación.

9.7 Características generales de las plantas estudiadas.

²⁸ Peña-Salamanca Enrique J, Madera-Parra Carlos A, Sánchez, Jesús M, Medina,Vásquez Javier 2013, realizaron una Bioprospección De Plantas Nativas Para Su Uso En Procesos De Biorremediación: Caso Heliconia Psittacorum (Heliconiaceae).

²⁹ AULESTIA, K. (18 de octubre de 2016). RESPUESTAS FISIOLÓGICAS DE TRES ESPECIES VEGETALES NATIVAS SOMETIDAS A TRATAMIENTO CON LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO. Universidad Del Valle. Obtenido de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/3903/4/CB-0463669.pdf>.

Para la selección de las plantas, (tabla 2) se tuvieron en cuenta aspectos fisiológicos como: hojas y tallos bien desarrollados, buen sistema radicular, que todas las plantas sean jóvenes y que tengan una altura homogénea³⁰.

Tabla 2: Características de las plantas estudiadas.

Especie vegetal		Familia	Descripción	Imagen
Nombre científico: <i>Heliconia psittacorum</i>		Heliconiaceae	Distribución geográfica: Brasil, Colombia, Guayana Francesa, Guayana, Surinam, Trinidad y Venezuela (SIAC, 2008) Características morfológicas: Sus hojas tienen peciolo de 11–32 cm de largo y una lámina de 37-60 cm por 6–10 cm. Inflorescencia erecta de 8-18 cm de largo. Hábitat: se desarrolla en piso tropical y de transición al premontano Uso: ornamental (SIAC, 2008).	
Nombre común: Heliconia				
Nombre científico: <i>Colocasia esculenta</i>		Araceae	Distribución geográfica: México, Islas del Caribe, Centroamérica, Suramérica, Asia, África, islas del océano Índico, islas del océano Pacífico y Australia. Características morfológicas: crecimiento del tallo de 0.7 a 1.2m (SIAC, 2008). Hábitat: Forman grandes agrupaciones alrededor de cuerpos de agua como manantiales, estanques, canales y otras áreas húmedas (SIAC, 2008). Usos: Especie ornamental	
Nombre común: Oreja de burro				

Fuente: Este estudio

9.8 Recolección y homogenización de vertimientos.

³⁰ AGUAYO GIRON, Carolina. Determinación De La Acumulación De Los Metales Pesados Plomo, Cadmio Y Cromo En La Planta Pistia Stratiotes Conocida Como Lechuga De Agua. Trabajo De Grado Para Optar Al Título De Pregrado En Química Farmacéutica. Santiago De Cali.: Universidad Icesi Facultad De Ciencias Naturales Química Farmacéutica. 2015. 126p.

Los vertimientos utilizados para la contaminación de las plantas, fueron traídas de la mina el Tamboral, (Municipio de Suarez-Cauca), el cual se escogió de acuerdo a las condiciones físicas del lugar (filtro de lodos en óptimo estado), lo que permitió que no todo el mercurio utilizado en la obtención del oro siga su curso.

Imagen 8: Toma de muestras.



Fuente: Este estudio.

se realizaron cuatro salidas de campo para la toma de muestras de agua utilizando 14 tarros de 25 litros cada uno, trayendo por viaje alrededor de 350 litros de vertimientos de la mina; los vertimientos se recolectaron directamente de los tanques de filtración (imagen 8), en donde se llenaron por un lapso de 3 minutos hasta que se llenara cada uno de los recipientes, luego se taparon y se sellaron con cinta para llevarlas al sitio de experimentación con las plantas ya sembradas y adaptadas a los sistemas.

Una vez trasladados los vertimientos y llevados a la zona de experimentación, se procedió a mezclar todos los vertimientos en un tarro de 500 litros para homogeneizarlos y dejar sedimentar los lodos que lograban pasar (imagen 8). Pasado un (1) día, se midieron los parámetros fisicoquímicos con ayuda de los equipos de laboratorio para pH,, conductividad, oxígeno disuelto, conductividad (electrodo) dureza, SDT, nitritos, nitratos,(espectrofotómetro UV visible) turbidez (turbidímetro), fosfatos, amonio, hierro (digestión previamente en reactor) , sólidos totales (horno) para el análisis de mercurio se realizó mediante (el equipo de absorción atómica) en el laboratorio de la CRC , la cual consistió en homogenizar todos los vertimientos de los tarros en uno solo y posterior a ello tener una muestra

individual para minimizar el efecto en las concentraciones de los elementos que se están analizando, que para este caso fue el análisis de mercurio.

9.10 Adaptación y Aclimatación.

El proceso de adaptación y aclimatación, se realizó con el objetivo de acostumbrar las plantas al agua contaminada, de tal forma que al iniciar el proceso de contaminación, éstas estén ya adaptadas a este tipo de vertimiento; para esto se agregó agua potable 2 veces por día (50ml) por dos semanas para aclimatarlas ; posteriormente se adaptaron a la grava durante 2 semana que es donde estuvieron en todo el montaje y por último la adaptación al agua contaminada con mercurio se realizó durante 2 semanas, empezando con 50 ml y terminando con 100 ml durante 7 días, para posteriormente ser llevadas al montaje experimental³¹ (imagen 9).

Imagen 9: Adaptación de plantas a los humedales.



Fuente: Este estudio.

9.11 Fase experimental de contaminación.

Una vez hecho el montaje (Imagen 10), se procedió a la etapa de contaminación de las UE, en donde las plantas seleccionadas, adaptadas, aclimatadas y sembradas en los recipientes, se pusieron a prueba con las muestras compuestas de los vertimientos contaminados con mercurio ($0.62 \mu\text{g/L}$ de Hg), observando su desarrollo durante la etapa de intoxicación. En dicha etapa se realizaron muestreos

³¹ Ibid., 12.

aleatorios semanales de las plantas, tomándoles medidas fisiológicas como número de hojas, diámetro y altura, para observar el estado de las plantas.

Imagen 10: Invernadero



Fuente: Este estudio

9.12 Mediciones Vegetales

Análisis de crecimiento. El análisis de crecimiento se realizó de forma cuantitativa, observando el número de ramificaciones nuevas que salieron por planta; para la descripción e interpretación del crecimiento de las plantas bajo condiciones artificiales se usaron medidas directas tales como la tasa de crecimiento relativo (TCR) y la tasa de crecimiento del cultivo (TCC), medidas que se tomaron directamente en el proceso³². Se tomaron 4 mediciones para acercarse a una aproximación real del crecimiento de las plantas, se tomaron medidas como: altura de la planta, altura de la raíz, diámetro del tallo, y número de ramificaciones nuevas por semana, sobre todo en *Colocasia esculenta*, que fue la planta que más ramificaciones tuvo durante el proceso, todos los parámetros fueron tomados con la ayuda de un metro y un pie de rey. Se contó el número total de hojas antes de

³² Hunt R. Plant grow analysis. [En línea] 1978. Disponible en: <https://people.exeter.ac.uk/rh203/rationale.pdf>. [Citado el 3 de Noviembre de 2016].

iniciar el proceso marcando la hoja más joven como número uno, y de ahí en adelante se contó las hojas nuevas a partir de la marcada. Se ubicó la primera hoja de la planta para posteriormente medir la altura. Se tomó como base la parte inicial desde el suelo hasta la base inferior de la primera hoja, este proceso se realizó con el metro.

Fase 3.

Toma De muestras vegetales para laboratorio.

En el transcurso del experimento Se tomaron 75 muestras vegetales antes, durante y al final del proyecto para determinar la cantidad de mercurio concentrado en las plantas; se realizó una muestra preliminar para determinar si las plantas tenían mercurio o no en sus organismos y así tener un valor de referencia inicial, posteriormente a ello se tomaron muestras al 25% (0,62 µg/L), 50% (0,85 µg/L), 75% (1,07 µg/L) y 100% (2,02 µg/L) de contaminación con mercurio para determinar la concentración final del Hg en las plantas. Para la toma de muestras del tejido vegetal, se escogió 1 planta al azar de cada unidad experimental (9 muestras vegetales), en donde se recolectaron muestras de: hojas, tallo y raíz. Posteriormente se llevaron a un horno de secado a una temperatura de 60°C durante 72 horas, pasado éste tiempo se pesaron y se tomó 100 mg (muestra compuesta de cada una de las partes de la planta y de las unidades experimentales) para ser digeridas en 2 ml de solución HNO₃/HClO₄ (7:1, v/v) a 80°C durante 6 horas y posteriormente enfriadas, filtradas y diluidas con agua destilada hasta 10 ml para su análisis de mercurio total por espectrofotometría de absorción atómica por vapor en frío³³ que se realizó en el laboratorio de la CRC el cual cuenta con toda la normatividad legal y los equipos técnicamente especializados para este tipo de análisis. Este procedimiento se realizó al inicio del proyecto y cada vez q se

³³ Ibid., 12.

BUELVAS AVILE, Alfonso Andrés. y RODRIGUEZ RODRIGUEZ, Gustavo Andrés. Capacidad De La Acacia Mangium Como Planta Fitorremediadora De Suelos Contaminados Con Mercurio. Trabajo De Grado Para Obtener Titulo Como Ingeniero Ambiental. Montería .: Universidad De Córdoba Facultad De Ingenierías Ingeniería Ambiental. 2017. 265p.

aumentaba la concentración de agua contaminada con mercurio (cada 2 meses) hasta finalizar con el 100% de vertimientos contaminados que nos permitió evaluar la concentración del metal total concentrado en las plantas durante el proceso.

9.13 Análisis estadístico.

Los datos obtenidos tales como la concentración de mercurio (Hg) y desarrollo morfológico de las plantas se organizaron en matrices Excel, el aumento en la concentración del hg en relación a *Colocasia esculenta* (Oreja de Burro) y *Heliconia psittacorum* (Heliconia) se analizó mediante la prueba de estadísticos descriptivos aplicando un análisis de varianza ANOVA, todo el paquete estadístico SPSS versión 20.0.

10. ANÁLISIS Y RESULTADOS.

A continuación, se presentan los resultados y análisis del trabajo de investigación de acuerdo a los objetivos específicos:

10.1 Implementación del bioensayo de fitorremediación con plantas bioacumuladoras de metales pesados.

El humedal artificial de flujo sub superficial con el cual se realizó el trabajo experimental, (imagen 11), permitió establecer una unidad familiar, asemejando las condiciones del suelo que se pueden encontrar en las zonas de estudio, este tipo de humedales, permitió el establecimiento de plantas como *Heliconia psittacorum* y *Colocasia esculenta*, en donde se obtuvieron resultados importantes, desde la adaptación y aclimatación, hasta la contaminación del 100% de vertimientos contaminados con mercurio, provenientes de minas que explotan oro.

El establecimiento de grava dentro de las unidades experimentales, según Madera³⁴. estableció una interacción entre el medio filtrante (grava) y el ecosistema

³⁴ Carlos A Madera; Enrique J Peña y Juliana A Solarte. Efecto de la concentración de metales pesados en la respuesta fisiológica y capacidad de acumulación de metales de tres especies vegetales tropicales empleadas en la fitorremediación de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios [en línea]: Ingeniería y competitividad, Volumen 16 (2014). [Consultado 23 de agosto de 2018]. Disponible en: http://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/3693

conformado por la rizósfera y las poblaciones microbiales adheridas al medio y las raíces, de acuerdo a lo registrado durante el tiempo establecido en el proyecto, se logró observar el crecimiento de “lama”, producto de la filtración y sedimentación de material particulado que pudiese contener el agua estudiada y de la transferencia de oxígeno dentro de la zona radicular, que permite el establecimiento de un ambiente aerobio para algunas poblaciones bacterianas, que pueden ayudar en la descontaminación no solo de metales pesado, sino de otro tipo de contaminantes, como por ejemplo, vertimientos de aguas residuales, lo que hace que este tipo de humedales, se preste para un sin número de investigaciones que permitan la descontaminación de fuentes hídricas de acuerdo al tipo de contaminación establecida.

Imagen 11: Humedales artificiales.



Fuente: Este estudio.

Al encerrar las unidades experimentales con malla nos ayudó a evitar daños estructurales en las UE y al cubrirlas con un techo, ayudó a controlar variables como la lluvia que podría de una u otra forma alterar los resultados sobre todo en la concentración de mercurio, ya que en tiempos de alta pluviosidad los niveles del contaminante (Hg), podrían variar, alterando las propiedades fisicoquímicas de los vertimientos, debido a la saturación de agua en las unidades experimentales³⁵.

³⁵ Ibid., 12.

10.2 Evaluación de la bioacumulación del mercurio de las plantas *Heliconia psittacorum* (heliconias) y *Colocasia esculenta* (orejas de burro) en el proceso de fitorremediación de aguas contaminadas con mercurio.

No se registraron diferencias significativas ($F=0,50$ $p \geq 0,05$) en la concentración de mercurio acumulado en las diferentes plantas utilizadas en el bioensayo. Según la tabla número 1, los análisis descriptivos arrojan una bioacumulación similar en cuanto al tallo, raíz y hojas, para cada una de las plantas estudiadas, sin embargo, las concentraciones del elemento Hg en raíces fueron altas, tanto en heliconias como en orejas de burro. Lo anterior también fue encontrado en los estudios realizados por Pérez, (2014), en donde las concentraciones en raíces fueron más altas en la mayoría de los casos en relación a los niveles de HgT en suelo, aunque no siempre ocurrió de esta forma en el caso de tallos y hojas, evidenciando que estas plantas utilizan el método de rizofiltración para acumular mercurio en esta parte de las plantas.

Tabla 3: Resultados Descriptivos.

		Resultados Descriptivos; Concentración de Hg en Plantas							
		N	Media	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
						Límite inferior	Límite superior		
Concentración de Hg Raíz $\mu\text{g/L}$	Orejas de burro	16	1,80	2,42	0,61	0,51	3,09	0,00	7,69
	Heliconias	16	1,33	1,23	0,31	0,68	1,99	0,00	3,69
	Total	32	1,57	1,91	0,34	0,88	2,25	0,00	7,69
Concentración de Hg Tallo $\mu\text{g/L}$	Orejas de burro	16	0,63	0,66	0,16	0,28	0,98	0,00	1,87
	Heliconias	16	0,77	0,48	0,12	0,51	1,03	0,00	1,44
	Total	32	0,70	0,57	0,10	0,50	0,91	0,00	1,87
Concentración de Hg Hojas $\mu\text{g/L}$	Orejas de burro	16	0,70	0,68	0,17	0,34	1,06	0,00	1,84
	Heliconias	16	0,75	0,50	0,12	0,48	1,01	0,00	1,49
	Total	32	0,72	0,59	0,10	0,51	0,93	0,00	1,84

Fuente: Este Estudio

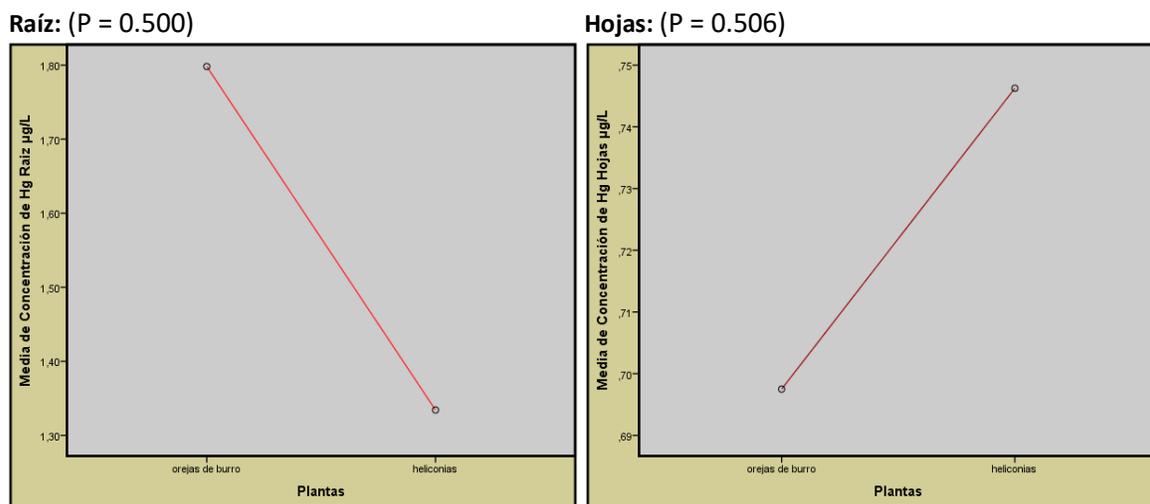
Para el caso del tallo, se muestra que la concentración en las heliconas fue mayor que en las orejas de burro, aunque estadísticamente acumulan lo mismo, hay una variación que permite determinar que planta ecológicamente concentra más mercurio y en que parte de la planta lo almacena más respecto a la otra. Igualmente pasa con las hojas, que según los resultados obtenidos se va a encontrar el

mercurio más acumulado en las heliconias, por lo anterior es importante resaltar que hay diferencias que ecológicamente podría ser importantes a la hora de escoger una planta para trabajar en procesos de descontaminación de aguas contagiadas por metales pesados.

Según Pérez³⁶, los niveles más altos de Hg fueron observados en las raíces de la *Colocasia esculenta*, mientras que la acumulación en tallos y hojas fue mucho mayor en *Heliconia psittacorum*, esto se corroboró al promediar los datos de concentraciones y graficarlos (Imagen 12).

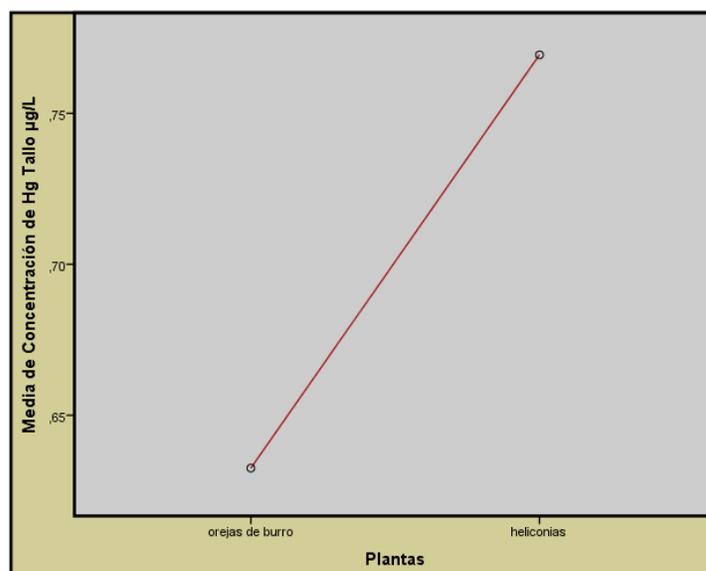
En la imagen 12 se muestra la comparación de la concentración de mercurio en Raíz, tallo y hojas respectivamente para *Heliconia psittacorum* y *Colocasia esculenta*.

Imagen 12: Acumulación de mercurio en plantas.



Tallo: (P = 0.819)

³⁶ Ibid., 18.



Fuente: Este estudio

La *Colocasia esculenta*, utiliza el método de rizofiltración para la acumulación del mercurio en sus raíces, según Sepúlveda³⁷, menciona que la mayor parte del mercurio acumulado está atrapado en las raíces y solo una pequeña cantidad puede ser traslocada a los tallos-hojas, lo que algunos autores indican como un mecanismo de defensa toxica, en donde el 80% del metal se adhiere a las paredes celulares, haciendo de la raíz una barrera que limita el paso del metal hacia las partes aéreas de la planta³⁸. Durante el trabajo realizado se evidenció que las raíces de las plantas abundaban en cada uno de los montajes en donde se sembraron, además esta fue la que mayor desarrollo morfológico tuvo durante el desarrollo del proyecto. El análisis de la concentración del Hg, demuestra que no hay una variación estadísticamente significativa ($p=0.50$), entre el mercurio acumulado en las raíces, los tallos y las hojas de cada una de las especies, pero, si hay una ligera evidencia, que nos permite identificar que planta acumula más mercurio en sus órganos. Según Madera³⁹, la concentración de metales pesados en raíces para *Colocasia esculenta*

³⁷ Niza I Sepúlveda. Desarrollo de un protocolo para la rizofiltración de efluentes contaminados con mercurio mediante la aplicación de filtros vegetales con la especie *Vetiver* (*Vetiveria zizainodes*). Universidad de Manizales, (2013). [Consultado 4 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/handle/6789/1581>

³⁸ PEREZ VARGAS, Hiver M. y VIDAL DURANGO, Jhon V. Revista Salud Pública Bogotá. En: Acumulación De Mercurio En Ají. . Diciembre, 2014. Vol. 16. No. 6., p.897-909.

³⁹ Ibid., 40.

fue superior a la acumulada en los tejidos aéreos, la translocación del metal de la parte subterránea a la aérea difiere significativamente.

10.2.1. Análisis ANOVA:

Según el análisis de varianza (ANOVA), (tabla N°4) para la concentración de mercurio en raíz, tallo y hojas, para las dos plantas, indica que las mayores concentraciones de mercurio, estuvieron presentes en las raíces, permitiendo concluir que estas especies utilizan la rizofiltración como método para la absorción de contaminantes; es importante resaltar que durante el trabajo realizado, se observó que estas plantas sobre todo en las orejas de burro las raíces abundaban en cada uno de los montajes experimentales, permitiendo así concentrar cantidades más altas en la raíz que en el resto de la planta, en donde se evidencia claramente que los niveles de mercurio son inferiores respecto a las encontradas en su parte baja.

Tabla 4: Análisis ANOVA.

		ANOVA				
		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Concentración de Hg Raíz µg/L	Entre grupos	1,72	1	1,72	0,47	0,50
Concentración de Hg Tallo µg/L	Entre grupos	0,15	1	0,15	0,45	0,51
Concentración de Hg Hojas µg/L	Entre grupos	0,02	1	0,02	0,05	0,82

Fuente: Este estudio.

De acuerdo a los resultados obtenidos, las heliconias y las orejas de burro acumulan mercurio en cada una de sus partes, las concentraciones varían en

cuanto a la raíz, tallo y hojas⁴⁰, lo que se puede evidenciar en los resultados arrojados en cada una de las muestras que se llevó para el análisis de laboratorio.

10.3 Determinación de la eficiencia de bioacumulación de mercurio de las plantas *Heliconia psittacorum* y *Colocasia esculenta* en el proceso de fitorremediación.

Tabla 5: Estadísticos descriptivos raíz.

Estadísticos descriptivos				
Variable dependiente: Concentración hg raíz µg/L				
% de mercurio	Planta	Media	Desviación estándar	N
25%	Oreja de burro	43,5	42,1	4
	Heliconia	67,8	51,1	4
	Total	55,6	45,2	8
50%	Oreja de burro	42,0	46,5	4
	Heliconia	144,3	109,0	4

⁴⁰ Ibid., 40.

	Total	93,1	94,9	8
75%	Oreja de burro	186,8	226,3	4
	Heliconia	69,5	48,4	4
	Total	128,1	164,0	8
100%	Oreja de burro	435,8	324,3	4
	Heliconia	188,0	198,1	4
	Total	311,9	281,8	8
Total	Oreja de burro	177,0	244,0	16
	Heliconia	117,4	118,3	16
	Total	147,2	191,1	32

Fuente: Este estudio

En la tabla de estadísticos descriptivos, podemos observar las diferencias en las concentraciones del contaminante de acuerdo al incremento del Hg que se agregaba al agua, se logra evidenciar con claridad que las Heliconias al 25% y al 50% de contaminación con los vertimientos estudiados, reaccionan de forma positiva acumulando el mercurio en diferentes partes de la planta (raíz, tallo, hojas), (tabla 6) según Madera⁴¹, a medida que las concentraciones del metal aumentan, las plantas reaccionan “bloqueándose” como mecanismo de defensa de la planta, ocasionando una mayor producción de enzimas con actividad peroxidasa, como por ejemplo, la ascorbato peroxidada, una enzima importante en los mecanismos antioxidantes de la planta, ya que al 75% y al 100% de contaminación con Hg, se encontraron concentraciones más bajas respecto a las orejas de burro, lo que podría significar que las heliconias son especies que servirían en la descontaminación de metales pesados en lugares con concentraciones bajas, es evidente que este tipo

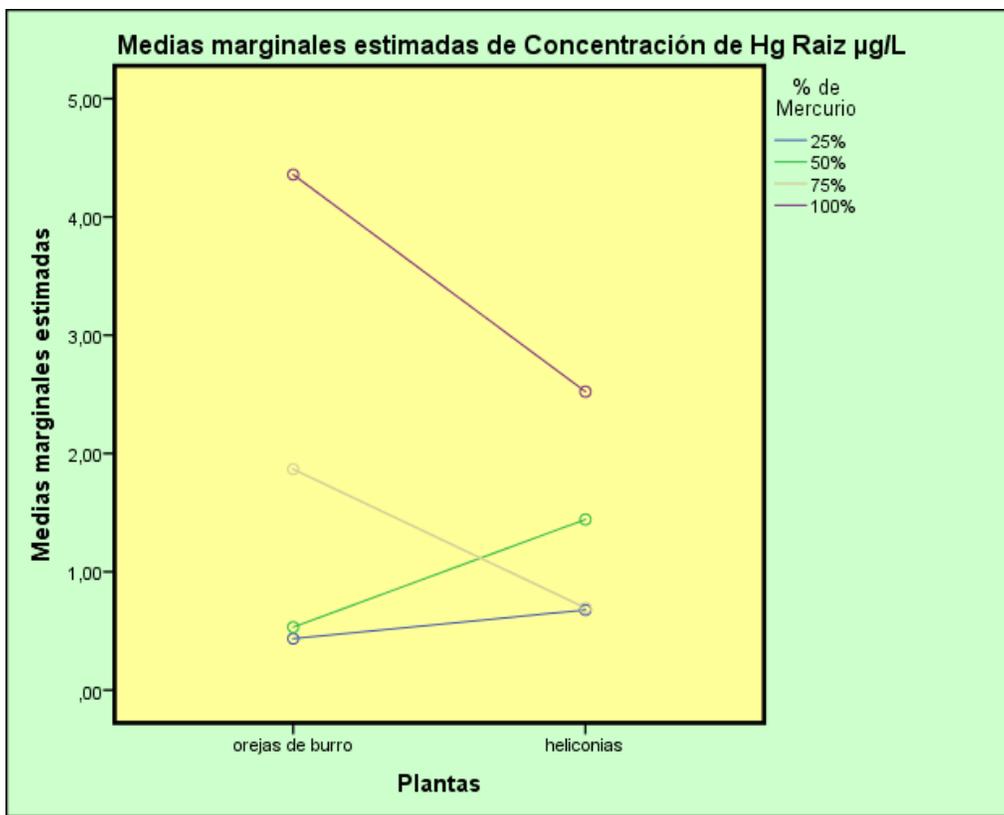
⁴¹ Ibid., 40.

de especies distribuyen el contaminante por toda la planta (raíz, tallo, hojas), y no lo acumulan en una sola parte como es el caso de las orejas de burro.

De acuerdo con lo expuesto por Parra⁴² con respecto a la *Colocasia esculenta*, esta especie tuvo un proceso de adaptación similar, esta planta concentro la mayor parte del mercurio en sus raíces pero tuvo un mayor desarrollo morfológico que las heliconias y fue la que mejor se adaptó al montaje experimental, con las orejas de burro se puede trabajar en zonas altamente contaminadas con mercurio $> 0 = a 2,02 \mu\text{g/L}$, obteniendo buenos resultados. (Imagen 13)

Imagen 13: Concentración de Hg en raíz.

⁴² Cita de parra



Fuente: Este Estudio

Observando la imagen 13, permite identificar que las heliconias concentran Hg de forma continua y más elevada que las orejas de burro hasta un 50% de contaminación, de ahí siguen acumulando, pero a un ritmo ya mucho menor que la *Colocasia esculenta*, en donde estas plantas ya empiezan a acumular la mayor parte del contaminante en sus raíces (imagen 16), y fue muy fácil comprobarlo, ya que las orejas de burro tenían un crecimiento “exagerado” de su raíz por todo el montaje, a comparación con las heliconias, en donde su desarrollo morfológico no fue el más esperado⁴³.

Tabla 6: Estadísticos descriptivos tallo.

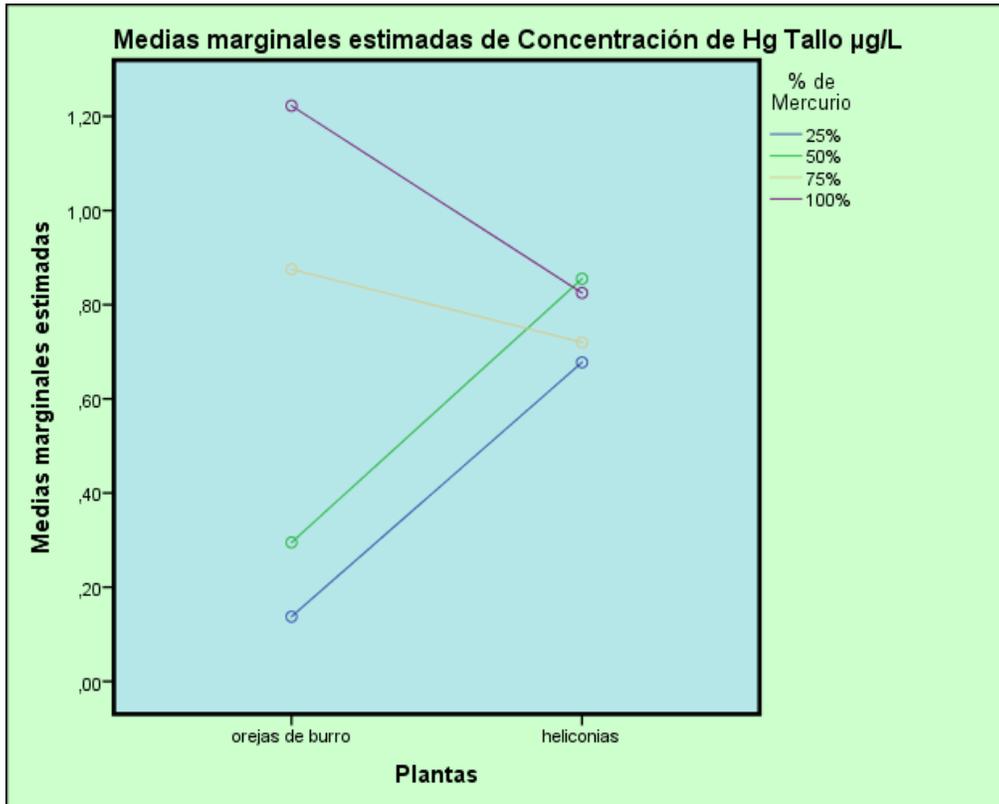
⁴³ Ibid., 40.

Estadísticos descriptivos				
Variable dependiente: Concentración tallo µg/L				
% de mercurio	Planta	Media	Desviación estándar	N
25%	oreja de burro	13,8	9,6	4
	Heliconia	67,8	45,3	4
	Total	40,8	41,9	8
50%	oreja de burro	29,5	20,2	4
	Heliconia	85,5	61,9	4
	Total	57,5	52,1	8
75%	oreja de burro	6,5	7,0	4
	Heliconia	72,0	48,2	4
	Total	39,3	47,3	8
100%	oreja de burro	122,3	84,8	4
	Heliconia	82,5	56,4	4
	Total	102,4	70,0	8
Total	oreja de burro	43,0	62,1	16
	Heliconia	76,9	48,3	16
	Total	60,0	57,4	32

Fuente: Este Estudio

Para el caso de concentración de mercurio en tallo hubo diferencias en la acumulación del mercurio en el tallo con respecto a las dos especies , acumulando las heliconias mayor cantidad que las orejas de burro hasta el 75% de contaminación, ya en el 100% se evidencia que las orejas de burro nuevamente acumulan más en concentraciones más altas (tabla 6).

Imagen 14: Concentración Hg tallo.



Fuente: Este Estudio

Con relación a la (Imagen 14) anterior, se puede observar cómo ha sido la concentración de Hg en el tallo de acuerdo al nivel de concentración del metal presente en el agua, como se mencionó anteriormente las heliconias se “bloquean”, como mecanismo de defensa (Madera⁴⁴), y no siguen acumulando más, mientras que las orejas de burro, tienen una concentración periódica, que le permite seguir acumulando sin ningún problema, aunque las heliconias acumularon un poco más que las orejas de burro, éstas servirían para sitios que contengan concentraciones no muy altas de contaminantes, ya que su mecanismo de defensa podría ser

⁴⁴ Ibid., 40.

bloqueándose, creando una barrera en la raíz que limita el paso del metal hacia las partes aéreas de la planta (Pérez⁴⁵)

⁴⁵ Ibid., 18.

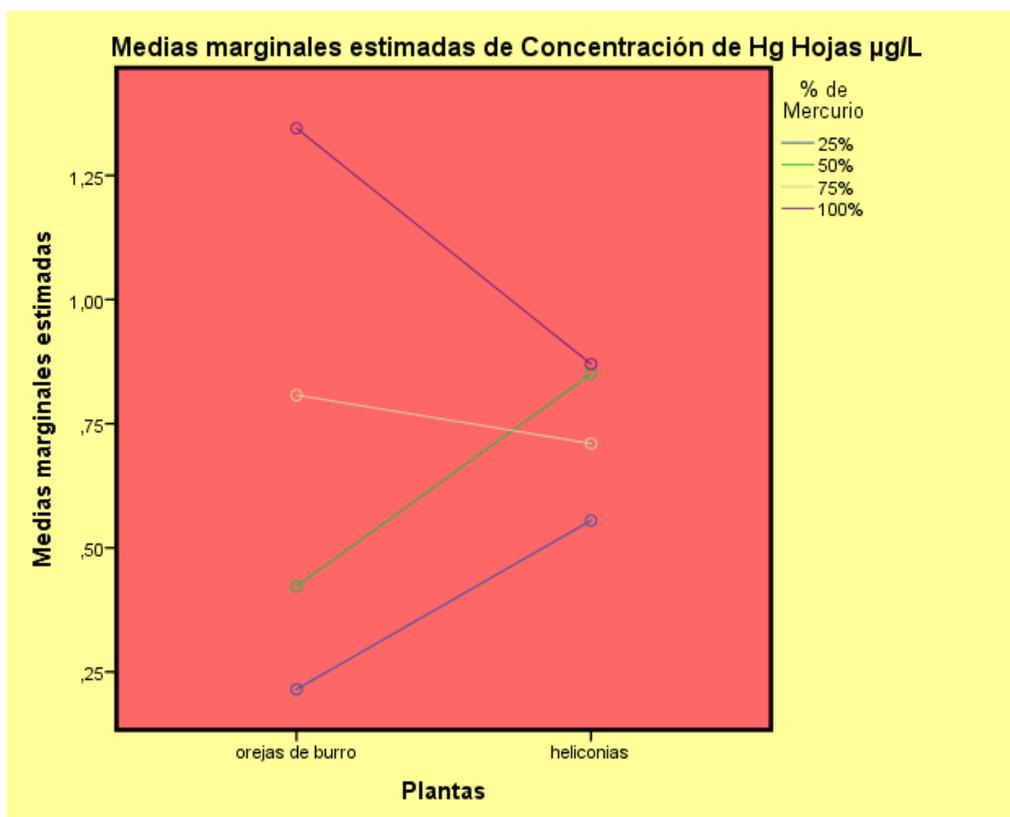
Tabla 7: Estadísticos descriptivos hojas.

Estadísticos descriptivos				
Variable dependiente: Concentración hojas µg/L				
% de mercurio	Planta	Media	Desviación estándar	N
25%	oreja de burro	21,5	22,1	4
	Heliconia	55,5	38,4	4
	Total	38,5	34,2	8
50%	oreja de burro	42,3	41,3	4
	Heliconia	55,8	57,6	4
	Total	49,0	46,9	8
75%	oreja de burro	80,8	55,0	4
	Heliconia	46,3	52,9	4
	Total	63,5	53,2	8
100%	oreja de burro	94,0	98,5	4
	Heliconia	87,0	66,2	4
	Total	90,5	77,8	8
Total	oreja de burro	59,6	62,3	16
	Heliconia	61,1	51,5	16
	Total	60,4	56,2	32

Fuente: Este estudio

Para la concentración de mercurio en hojas pasa lo mismo que con el tallo y la raíz, las heliconias ratifican su excelente acumulación en concentraciones bajas del contaminante (hasta un 50% (0,85 µg/L) de contaminación del agua. (Tabla 7)

Imagen 15: Concentración de Hg en hojas.



Fuente: Este estudio

De acuerdo a los resultados obtenidos y representados en dichas gráficas, la concentración de mercurio en las orejas de burro fue ascendente no tuvo retrocesos y reacciona positivamente al metal (Hg); el desarrollo morfológico de dicha especie nos permite analizar la facilidad de adaptación a las unidades experimentales que se trabajaron en este proyecto y como poco a poco se fue ajustando a las condiciones del medio para lograr los resultados finalmente obtenidos. (Imagen 15)

10.4 medidas de manejo de las plantas usadas para su disposición final.

En el documento planteamos que las heliconia y oreja de burro tienen la capacidad de bioacumular metales pesados en sus tejidos vegetales, (raíz, tallo, hojas) acumulando cantidades de hasta (2,02 µg/L) para *Colocasia esculenta* y de (0,85 µg/L) para *Heliconia psittacorum*. Es por ello que al captar este contaminante según

Arena y Hernández⁴⁶, las plantas una vez retiradas conservan en sus tejidos y raíces contenidos de mercurio en proporción a su capacidad de absorción, debe ser entonces considerado un residuo peligroso el cual debe tener un manejo de acuerdo a la legislación, en donde los límites máximos permisibles en los vertimientos de aguas residuales no domesticas a cuerpos de agua superficiales de actividades mineras es de Hg = 0,002 mg/L. Su disposición se deberá ejecutar en celdas de seguridad con un pre tratamiento de encapsulamiento, ya que el metal contenido en las plantas no se puede liberar nuevamente al ambiente por la degradación de la planta.

Una alternativa para su disposición final según Delgadillo⁴⁷ es cortarlas, secarlas y llevarlas a hornos de incineración para que de manera controlada se haga la eliminación del contaminante y así evitar que vuelva al ambiente y sus cenizas sean trasladadas a un relleno de seguridad.

Otra opción que se puede dar al finalizar el proceso de fitorremediación, es que una vez las plantas sean cosechadas se les dé un aprovechamiento en la fabricación o producción de biodiesel⁴⁸. Disposición final para este tipo de plantas utilizadas en los procesos de Fitorremediación y bioacumulación de metales pesados según "Tatiana Mosquera Córdoba en su tesis (2016)", es la utilización de la lombriz roja californiana la cual tiene la capacidad de bioacumular y descomponer entre un 75% y 85 % el metal contaminante⁴⁹.

46 ARENAS, Santiago. y HERNÁNDEZ CARO, Santiago Andrés. Fitotoxicidad Del Cadmio (cd) Y El Mercurio (hg) En La Especie Brassica Nigra. Ingeniero Ambiental. Medellin: Universidad De Medellín. 2012. 42p.

47 DELGADILLO-LÓPEZ, Angélica Evelin. y GONZÁLEZ-RAMÍREZ, César Abelardo. Fitorremediación: Una Alternativa Para Eliminar La Contaminación. En: Tropycal And Subtropical Agroecosystems. Mayo, 2011. Vol. 14. No. 2., p.45-58.

48 AZPILICUETA, Claudia. y GALLEGU, Susana. Los Metales Y Las Plantas: Entre La Nutrición Y La Toxicidad. En: Fondo Para La Conservación Ambiental. Abril, 2010. Vol. 20. No. 116., p.14-15.

49 MOSQUERA CORDOBA, Tatiana. Eficiencia Del Lombricompostaje En La Biorremedacion De Suelos Degradados Por La Minería A Cielo Abierto En El Municipio De Unión Panamericana, Departamento Del Chocó.. Magister En Desarrollo Sostenible Y Medio Ambiente. Manizales .: Universidad De Manizales. 2016. 123p.

11. DESARROLLO MORFOLÓGICO DE LAS PLANTAS.

De acuerdo al anexo número 1, se puede observar cómo ha sido el desarrollo morfológico de cada una de las dos especies; claramente se contempla como las orejas de burro crecieron mucho más que las heliconias evidenciando un mejor desempeño y adaptación a las unidades experimentales y por supuesto una mayor acumulación de mercurio en cada una de las partes de la planta, mientras que las heliconias se quedaron estancadas como medida de protección por la planta para no seguir acumulando más y evitarle daños, es por ello que se puede corroborar lo anteriormente dicho, que las heliconias son excelente acumuladores en concentraciones bajas, mientras las orejas de burro responden sin ningún problema a concentraciones superiores que las que resiste las heliconias. Según Sepúlveda⁵⁰, la necesidad y la capacidad de tolerancia de las distintas especies vegetales es variada, ocasionando que por cada especie se pueda establecer un rango de valores sobre los cuales comienzan a darse signos de toxicidad y la posibilidad que estos varíen con el desarrollo de fisiológico y morfológico de la planta.

12. CONCLUSIONES.

- Los humedales artificiales utilizados en el proyecto, permitieron establecer un sistema similar al medio natural que ayuda en el funcionamiento de las UE y al desarrollo fisiológico de las especies utilizadas.
- La *Heliconia psittacorum* y *Colocasia esculenta*, presentaron adaptabilidad y tolerancia al agua contaminada con mercurio, aunque su desarrollo morfológico varía entre las especies, los resultados obtenidos durante el proceso de adaptación y contaminación fueron positivos, ya que estas especies de plantas, acumularon mercurio entre sus tejidos.
- las plantas estudiadas sirven para implementarlas en procesos de fitorremediación variando los niveles de adaptación y acumulación según la especie utilizada, la concentración y el tipo de contaminante utilizado en dichos procesos.

⁵⁰ Ibid., 43.

- La *Heliconia psittacorum*, es una especie que se puede utilizar en fitorremediación como especie acumuladora de mercurio en concentraciones no muy altas, $\leq 0,85 \mu\text{g/L}$, ya que al incremento del contaminante, dichas plantas activan un mecanismo de defensa, como medida de protección acumulando el Hg en el tallo.
- La *Colocasia esculenta* acumulo la mayoría del mercurio en sus raíces, su desarrollo morfológico fue muy bueno, esta planta se puede utilizar en procesos de rizofiltración y se adapta muy bien a concentraciones de Hg en un rango de $0,87 \mu\text{g/L}$ - $2,02 \mu\text{g/L}$ según los resultados obtenidos por el laboratorio.
- La fitorremediación es una técnica esperanzadora para la descontaminación de aguas contaminadas, según otros estudios realizados, esta técnica sirve para limpiar sitios contagiados con hidrocarburos, plaguicidas, metales pesados, entre otros para hacerlos biodisponibles para la planta.
- En cuanto a la entrada de mercurio al montaje para *Colocasia esculenta* la concentración de mercurio fue de $0.62 \mu\text{g/L}$, y la salida del montaje fue de $0.24 \mu\text{g/L}$, al 25% de contaminación, en donde se evidencia la acumulación por parte de esta planta del mercurio en sus órganos.
- En *Heliconia psittacorum* para el 25 %, la entrada del mercurio fue de $0.62 \mu\text{g/L}$ y la salida del montaje fue de $0.29 \mu\text{g/L}$, en donde se evidencia la acumulación por parte de esta planta del mercurio en sus órganos.
- Según estos resultados, se concluye que las plantas utilizadas en este estudio sirven como plantas bioacumuladoras de mercurio en diferentes concentraciones, para *Colocasia esculenta* los rangos en que estas especies se pueden trabajar son entre $0.62 \mu\text{g/L}$ y $2.02 \mu\text{g/L}$ y para *Heliconia psittacorum* el rango es de $0.62 \mu\text{g/L}$ y $0.85 \mu\text{g/L}$.

13. RECOMENDACIONES

- En este estudio se trabajó solo con mercurio, sería muy relevante trabajar con otro tipo de metales o contaminantes como el plomo, cadmio, arsénico, entre otros, que contaminan y enferman los ecosistemas y al ser humano.
- Las aguas contaminadas con Hg, fueron traídas de una sola mina, se recomienda hacer el estudio en diferentes lugares para así determinar el nivel de contaminación que estas producen al medio ambiente.
- Realizar un estudio mucho más prolongado (tiempo), que permita identificar si los frutos o semillas obtenidos por las plantas se han contaminado, esto con el fin de identificar la translocación del contaminante en una planta madura.
- Sería de gran interés como recomendación de estudios futuros encaminados a la fitorremediación de suelos o aguas contaminadas con metales pesados, la utilización de otro tipo de plantas o árboles que tengan la capacidad para acumular grandes cantidades de metales pesados en sus tejidos, además que puedan ser de fácil adaptabilidad a cualquier medio.
- Este trabajo arrojó resultados importantes, se logró evidenciar la capacidad bioacumuladora de mercurio de la *Heliconia psittacorum* y *Colocasia esculenta* en humedales a escala de laboratorio. Se recomienda la utilización de este tipo de plantas para futuras investigaciones encaminados a la descontaminación de ambientes contaminados por metales pesados, además de llevar a escalas más grandes este tipo de humedales en los sitios donde se realiza la explotación aurífera de oro y la utilización del mercurio con el fin de disminuir la contaminación ocasionada por los vertimientos que se hacen en estas zonas, de esta forma prevenir enfermedades ocasionadas a la salud humana y ambiental.
- Se deben cubrir las unidades experimentales y encerrarlas, esto ayuda a controlar variables como lluvias y altas temperaturas, lo que no altera la fisicoquímica de las aguas y no marchita las plantas por el inclemente sol.

BIBLIOGRAFIA.

AGUAYO GIRON, Carolina. Determinación De La Acumulación De Los Metales Pesados Plomo, Cadmio Y Cromo En La Planta Pistia Stratiotes Conocida Como Lechuga De Agua. Trabajo De Grado Para Optar Al Título De Pregrado En Química Farmacéutica. Santiago De Cali.: Universidad Icesi Facultad De Ciencias Naturales Química Farmacéutica. 2015.

APOYO A PROYECTOS DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA EN MINERÍA PARA LOS DISTRITOS MINEROS DEL CAUCA, Evaluación minero-ambiental del distrito minero de Suarez. (23 de agosto de 2018) obtenido de <http://crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/mineria/MINERIA%20SUAREZ/MINERIALIZACION%20Suarez.pdf>

ARENAS, Santiago. y HERNÁNDEZ CARO, Santiago Andrés. Fitotoxicidad Del Cadmio (cd) Y El Mercurio (hg) En La Especie Brassica Nigra. Ingeniero Ambiental. Medellín: Universidad De Medellín. 2012.

AULESTIA, K. (18 de octubre de 2016). RESPUESTAS FISIOLÓGICAS DE TRES ESPECIES VEGETALES NATIVAS SOMETIDAS A TRATAMIENTO CON LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO. Universidad Del Valle. Obtenido de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/3903/4/CB-0463669.pdf>.

AZPILICUETA, Claudia. Y GALLEGO, Susana. Los Metales Y Las Plantas: Entre La Nutrición Y La Toxicidad. En: Fondo Para La Conservación Ambiental. Abril, 2010.

BAPTISTA, Gilberto. Y SICILIANO, Salvatore. Biomagnificación De Mercurio En La Cadena Trófica Del Delfín Moteado Del Atlántico (stenella Frontalis), Usando El Isótopo Estable De Nitrógeno Como Marcador Ecológico. Agosto, 2017.

BUELVAS AVILE, Alfonzo Andrés. y RODRIGUEZ RODRIGUEZ, Gustavo Andrés. Capacidad De La Acacia Mangium Como Planta Fitorremediadora De Suelos Contaminados Con Mercurio. Trabajo De Grado Para Obtener Titulo Como Ingeniero Ambiental. Montería .: Universidad De Córdoba Facultad De Ingenierías Ingeniería Ambiental. 2017.

Carlos A Madera; Enrique J Peña y Juliana A Solarte. Efecto de la concentración de metales pesados en la respuesta fisiológica y capacidad de acumulación de metales de tres especies vegetales tropicales empleadas en la fitorremediación de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios [en línea]: Ingeniería y competitividad, Volumen 16 (2014). [Consultado 23 de agosto de 2018]. Disponible en: http://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/articloe/view/3693

CIEMA, Tecnología Sostenible Para El Tratamiento De Aguas Residuales. Investigación. 2005. [Citado el 14 de Noviembre de 2016]. Disponible en internet: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/ii-109.pdf>.

DELGADILLO-LÓPEZ, Angélica Evelin. y GONZÁLEZ-RAMÍREZ, César Abelardo. Fitorremediación: Una Alternativa Para Eliminar La Contaminación. En: Tropical And Subtropical Agroecosystems. Mayo, 2011.

Departamento Administrativos Nacional De Estadística (DANE) (3 de noviembre de 2016). Obtenido de <http://www.dane.gov.co/>.

DIAZ, Arriaga. Mercurio En La Minería Del Oro: Impacto En Las Fuentes Hídricas Destinadas Para Consumo Humano. En: Salud Pública. Septiembre, 2014.

EPALZA, Gustavo Alberto. y PATIÑO, Carlos Alberto. Diseño Y Evaluación De Un Sistema Piloto De Descontaminación De Aguas Residuales A Partir De Plantas Hiperacumuladoras. Julio, 2015.

ESTUDIO CRIMINOLÓGICO ECRIM No 001, Minería ilegal en el Cauca. (23 de agosto de 2018). Obtenido de <https://policia.gov.co/file/41219/download?token=pZkeNXFJ>.

GALVES, J. (10 de septiembre de 2016). EL MERCURIO EN MINERÍA ARTESANAL: IMPACTO AMBIENTAL DEL MERCURIO. Obtenido de http://geco.mineroartesanal.com/tiki-download_wiki_attachment.php?attId=311.

GONZALES RAMIREZ, Cesar Abelardo. y VILLAGOMEZ IBARRA, José Roberto. Agroecosistemas Tropicales Y Subtropicales. En: Fitorremediación Una Alternativa Para Eliminar Contaminación. Mayo, 2011.

Hunt R. Plant grow analysis. [En línea] 1978. Disponible en: <https://people.exeter.ac.uk/rh203/rationale.pdf>. [Citado el 3 de Noviembre de 2016].

KIDD, P & BECERRA, C. (15 de septiembre de 2016). APLICACIÓN DE PLANTAS HIPERACUMULADORAS DE NÍQUEL EN LA FITOEXTRACCIÓN NATURAL: EL GÉNERO *Alyssum l.* .Ecosistemas; Revista Científica Y Técnica De Ecología Y Medio Ambiente. Obtenido de: <http://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/viewFile/126/123>.

LA FITORREMEDIACIÓN: Plantas para tratar la contaminación ambiental, (30 de agosto de 2018), Obtenido de <http://agricultureros.com/la-fitorremediacion-plantas-para-tratar-la-contaminacion-ambiental/>.

LOPEZ AFRICANO, Pedro Ernesto. y APRAEZ, Néstor. Hacia Una Producción Más Limpia En La Minería. Programa Para Minimizar La Contaminación Generada Por La Minería En El Sur Y Occidente Colombiano. Valle Del Cauca.: Cars. 2014.

MACANO, José Eugenio. Educación Ambiental En La Republica Dominicana. [EN LINEA]. Biodiversidad. 2011. [Citado en 27 de Noviembre de 2018]. Disponible en internet: <http://www.jmarcano.com/index.html>

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS Y FUNDACIÓN PARA EL DESARROLLO DEL QUINDÍO. (16 de septiembre de 2016). CARTILLA MINERA Obtenido de: http://www.simco.gov.co/Portals/0/archivos/Cartilla_Mineria.pdf.

MOSQUERA CORDOBA, Tatiana. Eficiencia Del Lombricompostaje En La Biorremediación De Suelos Degradados Por La Minería A Cielo Abierto En El Municipio De Unión Panamericana, Departamento Del Chocó.. Magister En Desarrollo Sostenible Y Medio Ambiente. Manizales .: Universidad De Manizales. 2016.

NAVARRO, Aviñó. y AGUILAR, Alonso. Aspectos Bioquímicos Y Genéticos De La Tolerancia Y Acumulación De Metales Pesados En Plantas. , 2011.

Niza I Sepúlveda. Desarrollo de un protocolo para la rizofiltración de efluentes contaminados con mercurio mediante la aplicación de filtros vegetales con la especie Vetiver (*Vetiveria zizainodes*). Universidad de Manizales, (2013). [Consultado 4 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/handle/6789/1581>

O M G, Organización Mundial Para La Salud. Mercurio Y La Salud. [EN LINEA]. Departamento De Salud Pública, Medio Ambiente Y Determinantes Sociales De La Salud. 2017. [Citado en 28 de noviembre de 2018]. Disponible en internet: <http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>

OLIVERO, J. (9 de septiembre de 2016). Efectos De La Minería En Colombia Sobre La Salud Humana. Obtenido de http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/forum_topic/3655/files/efectos_mineria_colombia_sobre_salud_humana.pdf.

Peña, Parra, Sánchez y Medina. BIOPROSPECTING OF NATIVE PLANTS FOR THEIR USE IN BIOREMEDIATION PROCESS: HELICONIA PSITTACORUM CASE (HELICONIACEAE). (Diciembre 2013) Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v37n145/v37n145a04.pdf>.

Peña-Salamanca Enrique J, Madera-Parra Carlos A, Sánchez, Jesús M, Medina, Vásquez Javier 2013, realizaron una Bioprospección De Plantas Nativas Para Su Uso En Procesos De Biorremediación: Caso Heliconia Psittacorum (Heliconiaceae).

PEREZ VARGAS, Hiver M. y VIDAL DURANGO, Jhon V. Revista Salud Pública Bogotá. En: Acumulación De Mercurio En Ají. . Diciembre, 2014.

PÉREZ, G & ENCISO, S. (16 de octubre de 2016). DISEÑO HIDRÁULICO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL A NIVEL LABORATORIO Obtenido de http://web.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/memorias/Extenso/TA/EC/TAC-20.pdf

POSADA, Martha Isabel. y ARROYAVE, María Del Pilar. Efectos Del Mercurio Sobre Algunas Plantas Tropicales. En: Escuela De Ingeniería Ambiental. Julio, 2006.

POSADA, Martha Isabel. En: Efectos Del Mercurio Sobre Algunas Plantas Tropicales. Julio, 2016.

SEPULVEDA ASPRIELLA, Niza Inés. Desarrollo De Un Protocolo Para La Rizofiltración De Efluentes Contaminados Con Mercurio Mediante La Aplicación De Filtros Vegetales Con La Especie Vetiver. Magister En Desarrollo Sostenible Y Medio Ambiente. Manizales.: Universidad De Manizales Facultad De Ciencias Contables Económicas Y Administrativas Maestría En Desarrollo Sostenible Y Medio Ambiente.

SUAREZ, K. (15 de septiembre de 2016). EVALUACIÓN DE LAS RESPUESTAS FISIOLÓGICAS DE ESPECIES VEGETALES TROPICALES Y SU USO EN LA BIORREMEDIACIÓN Y TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE RELLENOS SANITARIOS. .Universidad De La Amazonia, 2010.

USEPA. (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY). (2005). Mercury in medical facilities. [citado 22 julio 2005]. (<http://www.epa.gov/seahome/mercury/src/terms.htm>).

VIDAL, J. (15 de septiembre de 2016). Capacidad Del Guarumo (*Cecropia Peltata*) Como Planta Fitorremediadora De Suelos Contaminados Con Mercurio .Universidad Estatal Del Caribe. Obtenido de <http://190.242.62.234:8080/jspui/bitstream/11227/921/1/Proyecto%20de%20grado.pdf>.

ANEXOS.

Anexo 1: Desarrollo morfológico de las plantas.



Fuente: Este estudio.

Anexo 2: Mina el Tamboral, Suarez-Cauca.



Fuente: Este estudio.

Anexo 3: Sedimentadores Mina el Tamboral



Fuente: Este estudio.

Anexo 4: Sedimentador Mina el Tamboral



Fuente: Este estudio.

Anexo 5: Recolección de Vertimientos.



Fuente: Este estudio.

Anexo 6: Laboratorio De Muestras Vegetales Para El Análisis De Mercurio.



Fuente: Este estudio.

Anexo 7: Muestras líquidas para análisis de Hg.



Fuente: Este estudio.