

**CAPACIDAD DE LA ACACIA MANGIUM COMO PLANTA
FITORREMEDIADORA DE SUELOS CONTAMINADOS CON MERCURIO**



**ALFONSO ANDRÉS BUELVAS AVÍLEZ
GUSTAVO ANDRÉS RODRIGUEZ RODRIGUEZ**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL
MONTERÍA, CÓRDOBA
2017.**

**CAPACIDAD DE LA ACACIA MANGIUM COMO PLANTA
FITORREMIADORA DE SUELOS CONTAMINADOS CON MERCURIO**

**ALFONSO ANDRÉS BUELVAS AVÍLEZ
GUSTAVO ANDRÉS RODRIGUEZ RODRIGUEZ**

**Trabajo de grado presentado, en la modalidad de Trabajo de investigación y/o
extensión según resolución 006, como parte de los requisitos para optar al Título de
Ingeniero Ambiental.**

Directora:

MONICA CECILIA CANTERO BENÍTEZ, M.Sc. Suelos

Codirector:

GABRIEL ANTONIO CAMPO DAZA, candidato a M.Sc. Biotecnología

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA AMBIENTAL
MONTERÍA, CÓRDOBA**

2017.

**La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del
proyecto, serán responsabilidad de los autores.**

Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

A Dios por permitirme terminar esta etapa de mi vida a pesar del hecho de que muchas veces quise renunciar, en donde fraguó un sin número de casualidades que me condujeron hasta aquí.

A mi madre, mi eterna compañera de innumerables batallas, este triunfo puedes estar segura que es tan tuyo como mío.

A mi padre por su apoyo y respaldo incondicional.

Gustavo Rodríguez

*A Dios por brindarme sabiduría y la fortaleza para culminar esta investigación de la
mejor manera,*

A mis padres Roger y Elvira, por su apoyo en las buenas y en las malas,

*A mis amigos cercanos Félix “Pecora” y Carolina, que siempre fueron un apoyo
incondicional,*

*A mis maestros Alfonso Acevedo, Teobaldis Mercado que se interesaron en mi futuro y
siempre fueron una fuente de conocimiento y apoyo,*

*A los maestros Mónica Cantero, José Luis Marrugo y José Durango por su importante
aporte en el desarrollo de esta tesis.*

Alfonso Buelvas

Agradecimiento especial:

A la Universidad de Córdoba, que a través del Centro de Investigaciones (CIUC) financió la presente investigación.

Agradecimientos:

A la docente Mónica Cecilia Cantero Benítez, por su apoyo, valiosas orientaciones y acertadas sugerencias.

Al docente Gabriel Campo Daza, por su colaboración, apoyo y compartir generosamente su experiencia.

A los jurados Zoraya Martínez y Enrique Combatt, por sus valiosas sugerencias al documento final.

Al docente José Luis Marrugo, por su apoyo, asesoría y acertados consejos en la ejecución de la fase experimental y analítica.

A la funcionaria Liliana Barreto López, por su colaboración desinteresada y su apoyo en los procesos administrativos durante la ejecución del proyecto.

A todo el personal del Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental de la Universidad de Córdoba, por su apoyo en la fase analítica de la investigación.

A todo el personal del Laboratorio de Suelos y Aguas de la Universidad de Córdoba, por su apoyo en la fase analítica de la investigación.

Finalmente, los autores agradecen a la planta docente del Departamento de Ingeniería Ambiental por la capacitación académica y a todas las personas que colaboraron de una u otra forma para la ejecución del proyecto de investigación.

TABLA DE CONTENIDO.

	Pág.
RESUMEN.....	14
ABSTRACT.....	15
INTRODUCCIÓN	16
1. REVISIÓN DE LITERATURA.....	20
1.1 METALES PESADOS: MERCURIO.....	20
1.1.1 Transporte y distribución ambiental del mercurio	21
1.1.1.1 Mercurio en el suelo	22
1.1.2 Fuentes de contaminación por mercurio.....	23
1.1.2.1 El mercurio en la minería colombiana.....	24
1.2 FITORREMEDIACIÓN	25
1.3 ACACIA MANGIUM.....	28
1.4 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	30
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	36
2.1 GENERALIDADES DEL INVERNADERO	36

2.2	DISEÑO EXPERIMENTAL	37
2.2.1	Germinación de semillas	37
2.2.2	Recolección del suelo	38
2.2.3	Dopaje de suelo con mercurio	39
2.2.4	Siembra de plántulas	40
2.2.5	Seguimiento y cuidado plántulas	41
2.2.6	Observaciones a plántulas	41
2.2.7	Toma de muestras	42
2.2.8	Análisis de laboratorio	43
2.3	ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	44
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
3.1	CARACTERÍSTICAS DEL SUELO	46
3.2	CAPACIDAD DE EXTRACCIÓN LA <i>ACACIA MANGIUM</i> DE ACUERDO A SU PERIODO VEGETATIVO Y TIPO DE TRATAMEINTO.	48
3.3	CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE MERCURIO DENTRO DE SU PERIODO VEGETATIVO.	60

4. CONCLUSIONES.....	67
5. RECOMENDACIONES.....	68
6. BIBLIOGRAFÍA.....	70
ANEXOS	79

LISTADO DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Resultados generales de los ensayos experimentales	80
Anexo 2. Porcentajes de remoción de Hg total.	82
Anexo 3. Concentración de Hg total en plantas a diferentes edades	83
Anexo 4. Seguimiento semanal de altura a ensayos experimentales.	84
Anexo 5. Resultados de laboratorio de suelos	88
Anexo 6. Resultados laboratorio de toxicología ambiental	89

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Mecanismos de desintoxicación de contaminantes por fitorremediación.....	27
Tabla 2. Características generales de la <i>Acacia Mangium</i>	29
Tabla 3. Resultados de concentraciones de mercurio en suelo y plantas.....	49
Tabla 4. Análisis de varianza a las variables de estudio	50
Tabla 5. Valores medios del efecto del tiempo sobre la concentración de mercurio en la planta.	51
Tabla 6. Resultados de Regresión.	55
Tabla 7. Tasa de remediación de <i>Acacia Mangium</i>	58
Tabla 8. Resultados de seguimiento a las plantas (2 y 4 meses).....	61

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Germinación de semillas de Acacia Mangium	38
Ilustración 2. Homogenización de suelo	39
Ilustración 3. Mezcla de suelo y solución de Hg para concentración de 1 µg/g	39
Ilustración 4. Esquema de plántulas en el invernadero.	40
Ilustración 5. Plántulas trasplantadas a materas con diferentes concentraciones de mercurio.	40
Ilustración 6. Toma de altura de plantas de A. Mangium en suelo testigo.	42
Ilustración 7. Tendencia en el incremento de la disponibilidad de metales pesados.	47
Ilustración 8. Ensayos de Acacia Mangium a 5µg/g a los 2 meses (A) y 4 meses (B). ..	60

LISTADO DE GRAFICOS

Grafico 1. Relación entre ensayos experimentales y concentración de mercurio en el Suelo. Letras iguales no hay diferencia y letras diferente hay diferencia significativa, según prueba de Tukey.....	53
Grafico 2. Relación entre ensayos experimentales y masa inicial de la planta. Letras iguales no hay diferencia y letras diferente hay diferencia significativa, según prueba de Tukey.....	54
Grafico 3. Relación entre ensayos experimentales y masa seca de la planta. Letras iguales no hay diferencia y letras diferente hay diferencia significativa, según prueba de Tukey.....	54
Grafico 4. Análisis de regresión entre concentración de mercurio en el suelo y Hg aplicado a los ensayos.	55
Grafico 5. Análisis de regresión entre concentración de mercurio en las plantas y Hg aplicado a los ensayos.	56
Grafico 6. Análisis de regresión para # de hojas y dosis de Hg aplicada	63
Grafico 7. Correlación de Pearson a altura de la planta Vs dosis de Hg aplicado	64
Grafico 8. Análisis de regresión para masa inicial Vs Dosis de Hg aplicado	65
Grafico 9. Análisis de regresión para masa seca Vs Dosis de Hg aplicado	65
Grafico 10. Altura de las plantas Vs edades	66

RESUMEN

La contaminación de los suelos por metales pesados es un problema ambiental que afecta de forma generalizada a la población. En la actualidad, las actividades antrópicas realizadas de forma irresponsable han generado la acumulación de contaminantes en el suelo, quedando accesibles para la absorción en las raíces y tejidos de las plantas; impactando la calidad de los alimentos, la seguridad de la producción de cultivos y la salud del medio ambiente; ya que estos se mueven a través de la cadena alimenticia vía consumo de plantas por animales y estos a su vez por humanos. En este sentido, se requieren tecnologías de fácil acceso, bajos costos y alta eficiencia para la remediación de suelos contaminados, es por ello que el objeto del presente estudio fue determinar la capacidad de *Acacia Mangium* como planta fitorremediadora de suelos contaminados con mercurio, a través de un ensayo experimental donde se evaluó la extracción de mercurio por la planta en diferentes periodos vegetativos (2 y 4 meses) a concentraciones 1 $\mu\text{g/g}$, 2,5 $\mu\text{g/g}$ y 5 $\mu\text{g/g}$. Se obtuvo que la planta extrajo Hg durante el periodo estudiado, sin afectar la fisiología de la planta, ni presentando procesos de clorosis o necrosis, sin embargo, las tasas de remoción fueron bastante variadas donde los mejores resultados corresponden a los dos primeros meses de crecimiento.

Palabras Clave: Mercurio, *Acacia Mangium*, fitorremediación, suelos contaminados.

ABSTRACT

Contamination of soils by heavy metals is an environmental problem that affects the generalized form of the population. Currently the irresponsible anthropic activities have generated the accumulation of contaminants in the soil, being accessible for the absorption in the roots and tissues of the plants impacting the quality of the food, the safety of the crop production and the health from the environment, as these move through the food chain via consumption of plants by animals and these in turn by humans. In this sense, it is necessary the technologies of easy access, low costs and high efficiency for the remediation of contaminated soils, for which reason the objective of the present study was the capacity of *Acacia Mangio* as phytoremediation plant of soils contaminated with mercury through An experimental trial where the extraction of mercury by the plant in different vegetative periods (2 and 4 months) at concentrations 1 $\mu\text{g/g}$, 2,5 $\mu\text{g/g}$ and 5 $\mu\text{g/g}$ was obtained, obtaining that the plant extracted Hg during the period Studied without affecting the physiology of the plant nor present the processes of chlorosis or necrosis, however, the rates of removal were quite varied where the best results were in the first months of development.

Keywords: Mercury, *Acacia Mangium*, phytoremediation, soils pollution.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la degradación de suelos se ha convertido en un importante problema ambiental. La erosión, contaminación, salinización y desertificación son fenómenos degradativos particularmente preocupantes por su efecto negativo en los ecosistemas, los organismos y las comunidades. Los factores desencadenantes de estos procesos en el suelo pueden tener un origen natural o antrópico, debido a actividades de tipo agrícola, industrial o residual; ya sea a través de vertidos, de emisiones o de un incorrecto depósito (Oyarzun et al. 2011, Galán y Romero 2008).

El problema de la contaminación de suelos por mercurio (Hg) ha generado un creciente impacto ambiental a nivel mundial. Puede encontrarse en suelos de forma natural o debido a actividades antrópicas, como la explotación aurífera en la cual es utilizado para separar el oro de otros compuestos acompañantes, liberando cantidades importantes al ambiente. En el suelo el mercurio es absorbido por las plantas y debido a la propiedad que tiene de biomagnificarse, se convierte en un problema de salud pública. Por otra parte, es retenido por la materia orgánica y por los óxidos de hierro y manganeso, principalmente, y por los minerales de arcilla lo que genera que permanezca por largos periodos en el suelo (Olivero y Johnson 2002, Baird 1999, Desauziers et al. 1997). Las plantas cultivadas en suelos contaminados absorben en general más oligoelementos y la concentración de éstos en los tejidos vegetales está a menudo directamente relacionada con la abundancia del medio, lo cual puede impactar la calidad de los alimentos, la seguridad en la producción de cultivos y la salud del ambiente, ya que estos se mueven a

través de la cadena alimenticia vía consumo de plantas por animales y estos a su vez por humanos (Olivero y Johnson 2002).

En Colombia en 2010, la Defensoría del Pueblo reportó que el 28% de las unidades de explotación minera se dedicaban a la explotación de oro. El censo minero departamental 2010-2011, reveló que, de las 4.133 unidades de producción minera de oro censadas, el 86,7% no contaban con título minero, lo que indica una mayor probabilidad que se generen impactos en el medio ambiente por contaminación debido a la falta de rendición de cuentas a las autoridades ambientales competentes (Fedesarrollo 2008). El mayor número de unidades de explotación sin título minero se encontraban en 10 departamentos: Antioquia, Atlántico, Bolívar, Cauca, Córdoba, Chocó, Guajira, Magdalena, Risaralda y Valle del Cauca; en estos departamentos por lo menos el 80% de las unidades de explotación minera censadas no poseían título minero (Fedesarrollo 2008).

Es por todo lo anterior, que a nivel mundial se ha hecho necesario el desarrollo de estrategias y tecnologías que busquen mitigar los impactos de la contaminación por mercurio. Dentro de las tecnologías de remediación que presentan mayores ventajas a la hora de su implementación y menores costos se encuentra la fitorremediación, la cual, consiste en el uso de plantas para la extracción de contaminantes del suelo. Este método busca mejorar la calidad del suelo de acuerdo a la efectividad en la disminución del contaminante en el medio y su repercusión en el mejoramiento de la calidad de vida de las comunidades que se ven afectadas. Entre las especies de plantas investigadas para los procesos de remediación de suelos contaminados están: Guarumo (*Cecropia peltata*),

Caña flecha (*Gynerium sagittatum*), gramíneas (variedades de *Brachiaria*), helechos (*Pterislongifolia*) y roble morado (*Tabebuia rosea*), entre otras (Marrugo et al. 2012, Ortega et al. 2011, Vidal et al. 2010, Sangabriel et al. 2006).

Es así, que surge el interés y la necesidad de ampliar la información en cuanto a la variedad de plantas con la capacidad de extracción de contaminantes del suelo y que respondan de manera favorable a las condiciones ambientales del área geográfica donde se da el proceso de contaminación. Esta investigación se concentra en la capacidad fitorremediadora de la *Acacia mangium*, la cual ha sido sembrada en diferentes zonas del país como el bajo Cauca Antioqueño, el sur de Córdoba, Magdalena medio y los Llanos Orientales. Además, Corantioquia ha promovido su siembra con el fin de recuperar los ecosistemas degradados por la actividad minera aurífera, buscando recuperar las características físicas del suelo en su jurisdicción, desconociendo su capacidad de extracción de mercurio (Mateus 2013).

Con base en lo anterior, el objetivo general del presente estudio consiste en determinar la capacidad de *Acacia mangium* como planta fitorremediadora de suelos contaminados con mercurio (Hg). Para su alcance se desarrollaron los siguientes objetivos específicos: a) Determinar la capacidad de extracción de la *Acacia mangium* de acuerdo a su periodo vegetativo, b) Comparar la capacidad de extracción a diferentes concentraciones de mercurio, y, c) Identificar las características morfológicas a diferentes concentraciones de mercurio dentro de su periodo vegetativo. La metodología básicamente consistió en la siembra y seguimiento de las plántulas en un invernadero controlado sobre un diseño factorial que tiene como variable de respuesta la concentración de mercurio total (HgT)

en suelo y tejidos tomando muestras periódicas y analizándolas en el laboratorio con el fin de tener un seguimiento y evolución de la minimización de la concentración de este elemento traza en los suelos.

El presente documento se desarrolla a través de tres secciones: la primera describe los aspectos introductorios, los soportes teóricos y las herramientas metodológicas utilizadas; la segunda presenta los resultados y la discusión a los temas de extracción de mercurio por las plantas, capacidad fitorremediadora de la planta y caracterización química del suelo; finalmente, la tercera plantea las conclusiones derivadas del análisis precedente.

1. REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 METALES PESADOS: MERCURIO

Los metales pesados son elementos químicos que muestran una elevada tendencia a bioacumularse y a biomagnificarse en su paso por las cadenas tróficas, de manera general presentan una densidad igual o superior a 5g/cm^3 cuando están en forma elemental y su número atómico es superior a 20, excluyendo a los metales alcalinos y alcalino-térreos (Serrano 2006, Delgadillo et al. 2011). Tienen su origen en el substrato litológico, por tanto, su dinámica y disponibilidad están muy influenciadas por las condiciones fisicoquímicas del suelo en el que se encuentran (Ortiz et al. 2010). El cadmio, plomo y mercurio, hacen parte de los principales contaminantes ambientales, considerado este último uno de los más tóxicos al generar grandes impactos a escala mundial (Argota et al. 2014, Cartaya et al. 2011, Ortiz et al. 2009, Vidal 2009, Ortega et al. 2011).

El mercurio es el único metal en estado líquido a presión y temperatura ambiente. Esta característica sumada a una presión de vapor baja, permite que su movilidad en el aire y en el agua sea significativa (PNUMA y MADS 2012, Ortega et al. 2011). El mercurio puede existir en tres estados de oxidación estables: 0 (elemental), I (mercurioso) y II (mercúrico), los cuales determinan sus propiedades y comportamiento, siendo en los estados de oxidación mercúrico y mercurioso donde se forma un gran número de compuestos orgánicos e inorgánicos comúnmente encontrados en la naturaleza (Fernández et al. 2010). Los compuestos organometálicos de mercurio son estables al

oxígeno y al agua y por tanto persistentes en el ambiente (Vidal 2009, Swain et al. 2007).

1.1.1 Transporte y distribución ambiental del mercurio

El mercurio, está en la naturaleza en forma de mineral cinabrio, que es un sulfuro de mercurio. El sulfuro de mercurio, es prácticamente inatacable por los agentes atmosféricos (CO_2 , O_2 y H_2O) y no entra en el ciclo del agua, por lo que la incorporación del mercurio a las cadenas tróficas por esta vía, es insignificante. La principal incorporación de mercurio a las cadenas tróficas, es a partir del propio Hg metal, ya que es volátil y a temperatura ambiente se sublima, con lo que se incorpora a la atmósfera en forma de vapor (Doadrio 2014).

En un entorno natural, la movilidad del mercurio se puede dividir en tres grupos; la primera fracción, considerada la *fracción móvil*, corresponde a las especies orgánicas (metilmercurio) y las sales de Hg^{2+} . La *fracción semimóvil* se refiere principalmente a mercurio elemental y amalgamas; y la *fracción inmóvil* se refiere a HgS y calomel (Hg_2Cl_2). Ahora bien, los compuestos de mercurio más comunes en el medio ambiente son las especies inorgánicas de Hg (II), HgCl_2 , $\text{Hg}(\text{OH})_2$ y HgS , y en menores proporciones, organomercuriales como dimetilmercurio o fenilmercurio (Martínez y Uribe 2015, Gaona 2014, Vidal 2009).

Dado su presión de vapor, el mercurio se volatiliza de la matriz suelo y una vez en la atmósfera el mercurio elemental puede ser convertido a la forma soluble (Hg^{2+}) como producto de procesos de oxidación-reducción o reacciones fotoquímicas, retornando

luego a la superficie de la tierra mediante las precipitaciones. En aguas oceánicas, la concentración de mercurio oscila entre 0,3 y 4,4 ng/L y forma principalmente hidróxidos y cloruros, y de manera disociada en la forma iónica HgCl_4 (González y Paternina 2015, Martínez y Uribe 2015, Gaona 2014, Vidal 2009).

En ambientes acuáticos y suelos, el Hg se convierte en metilmercurio (MeHg), que es mucho más tóxico que el mercurio (Hg^0) y debido a la alta afinidad de este contaminante a los grupos sulfhidrilo de las proteínas, es rápidamente incorporado en la cadena alimentaria, bioacumulado en los organismos acuáticos, y biomagnificado de un nivel trófico a otro, lo que supone una amenaza potencial para la salud de los seres humanos, generando graves efectos toxicológicos, como neurotoxicidad, nefrotoxicidad, teratogénesis, neumonitis intersticial, entre otros (Argumedo et al. 2015, Olivero 2015, Español 2012, Weinberg 2010, Swain et al. 2007).

1.1.1.1 Mercurio en el suelo

De manera general, existen tres formas en las que es posible encontrar la especie química del mercurio Hg^{2+} , de forma natural en el suelo: por depósito atmosférico, por meteorización del sustrato litológico y por la descomposición de la vegetación. El mercurio puede ser absorbido con mucha facilidad por las arcillas, los óxidos de hierro y la materia orgánica, por ende, factores como su absorción y movilización están directamente relacionado con los rangos de pH. Esta movilidad puede aumentar con la formación de complejos con la materia orgánica y otros iones presentes en el suelo; pero, disminuye en condiciones reductoras debido a su precipitación en forma de sulfuro (Vidal et al. 2010, Millán et al. 2007, Dongsheng-Che et al. 2006, Kumar 2005).

1.1.2 Fuentes de contaminación por mercurio

El mercurio es un contaminante global, sigue de forma natural una dinámica cíclica que se ve influenciada por las actividades antrópicas, lo que genera que se encuentre en cualquier punto de la tierra en cantidades que dependen tanto del flujo continuo del elemento entre la atmósfera, la tierra y el agua de su ciclo global natural, como de las perturbaciones generadas por la actividad humana (Fernández et al. 2010, Vidal et al. 2010).

La presencia de metales pesados en los suelos puede deberse a factores geológicos o antropológicos. Los primeros dependen, en gran medida, de la denominada geodisponibilidad, que hace referencia a la porción de un elemento o compuesto químico que puede liberarse a la superficie o cerca de ella, por procesos mecánicos, químicos o biológicos. Pero la geodisponibilidad de los elementos de las rocas y su aportación al suelo es insignificante en comparación con las derivadas de las acciones antropogénicas (Galán et al. 2008). Las principales concentraciones anómalas de metales pesados y elementos traza en suelos, procede mayoritariamente de la extracción de recursos minerales, sobre todo de menas metálicas (sulfuros, óxidos). Estas extracciones, han generado la disposición de grandes volúmenes de residuos, la mayoría con piritita y otros sulfuros, cuya oxidación libera grandes cantidades de metales pesados. Los residuos, se concentran generalmente en escombreras, sobre todo en la minería a cielo abierto, pero también se depositan en pantanos de lodos procedentes del lavado del mineral (Belmonte et al. 2010).

1.1.2.1 El mercurio en la minería colombiana

En la actualidad una de las principales actividades que libera mercurio al ambiente, es la minería, en especial explotación y beneficio de oro por procesos poco tecnificados. Dentro de la extracción mundial del oro, el beneficio aurífero de forma artesanal en pequeña escala se ha convertido en una fuente importante de ingresos para mineros, especialmente en comunidades y regiones rurales donde las alternativas económicas son sumamente limitadas. De acuerdo a las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Mundial para la Salud (OMS) (2008) “La minería del oro artesanal y en pequeña escala es, por sí sola, la mayor fuente de liberación intencional de mercurio del mundo”.

La minería artesanal del oro es la actividad extractiva de mayor informalidad en Colombia, los mineros realizan su oficio sin la mediación de ningún tipo de título o permiso de explotación. Por otra parte, este tipo de extracción la realizan grupos de individuos en áreas de explotación tradicional y en algunos casos áreas inexploradas, cuya ubicación geográfica y/o conflictos sociales dificultan aún más la labor de seguimiento estatal colocando en riesgo el equilibrio ambiental y la salud de los trabajadores (Goana 2014, PNUMA y MADS 2012, OMS y PNUMA 2008).

El mercurio, dentro de la industria minera artesanal y semi-industrial, es utilizado al aprovechar su propiedad de aleación con metales y de esta manera lograr la extracción del oro del material rocoso. Una vez formada la amalgama oro -mercurio, es calentada y

el mercurio elemental evaporado, en muchos casos sólo el 10% del mercurio agregado a un barril o a una batea (en el caso de la amalgamación manual) se combina con el oro para producir la amalgama. El resto (el 90%) es sobrante generalmente liberado al medio ambiente (Martínez y Uribe 2015, Olivero 2015). Según un informe del PNUMA de 2008, anualmente, esta actividad consume 806 toneladas y genera emisiones del orden de 150 toneladas.

1.2 FITORREMEDIACIÓN

Las técnicas de remediación del suelo involucran procesos físicos, químicos y térmicos, buscando remover el contaminante o minimizar el riesgo de exposición. Dentro de la clasificación de estas técnicas se encuentran: *la contención* como el caso de la instalación de barreras verticales y horizontales; *solidificación y estabilización del contaminante* inyectando agentes de tratamiento para obtener residuos sólidos, reducir la solubilidad y disminuir el contacto entre fluidos; *separación y concentración* realizando lavado del suelo y pirometalurgia. Ahora bien, en las últimas décadas del siglo XX surgieron tecnologías basadas en el empleo de organismos vivos para descontaminar suelos o emplazamientos contaminados y recuperar los ecosistemas afectados como es el caso de la Fitorremediación. (Carpena y Bernal 2007, Serrano 2006, González et al. 2008, Ortega et al. 2011).

La fitorremediación es una tecnología in situ usada para degradar, transformar, asimilar, metabolizar o retener los contaminantes por medio del uso de plantas y técnicas

agronómicas. Tiene como característica más relevante que solo origina cambios menores en el medio, ofreciendo una solución más simple y completa que las tecnologías mecánicas a un menor costo de implementación (Qixing et al. 2011, Ortega et al. 2011, Carpena y Bernal 2007, Cobbett y Meagher 2002). Sin embargo, la aplicación de la fitorremediación tiene limitaciones: la profundidad de penetración de las raíces, la fitotoxicidad en áreas fuertemente contaminadas, los tiempos de proceso pueden ser muy prolongados y la biodisponibilidad de los compuestos para la captación. Para superar estas limitaciones es indispensable comprender los mecanismos, las fases que participan en la fitorremediación y las interacciones planta-microorganismo (Cunningham et al. 1997 citado en López et al. 2005). Por otra parte, la fitorremediación ocupa un lugar importante porque es una tecnología emergente basada en la acción combinada de plantas (terrestres o acuáticas) con comunidades microbianas nativas (López et al. 2005). La desintoxicación de contaminantes por fitorremediación se realiza empleando al menos uno de los siguientes mecanismos: fitoextracción, rizofiltración, fitoinmovilización, fitoestabilización, fitovolatilización y fitodegradación. En la tabla 1 se hace una breve descripción de ellos.

Tabla 1. Mecanismos de desintoxicación de contaminantes por fitorremediación

Mecanismos	Características
Fitoestabilización	Reduce la movilidad de los contaminantes y evita su migración a las aguas subterráneas o al aire. Inmoviliza contaminantes en el suelo a través de su absorción y acumulación en las raíces o bien, por precipitación en la zona de la rizosfera.
Rizofiltración	Elimina del medio hídrico contaminantes a través de la raíz por medio de plantas acuáticas. Se introducen en el agua contaminada las raíces, estas se van saturando, mientras absorben y acumulan los contaminantes.
Fitoextracción o fitoacumulación	Absorbe de metales contaminantes mediante las raíces de las plantas y su acumulación en tallos y hojas.
Fitovolatilización	Uso de árboles y otras plantas en crecimiento que absorben agua junto con contaminantes orgánicos e inorgánicos, algunos de estos pueden llegar hasta las hojas y evaporarse o volatilizarse en la atmósfera.
Fitodegradación	Uso plantas y los microorganismos para degradar los contaminantes orgánicos en productos inofensivos, o bien, mineralizarlos hasta CO ₂ y H ₂ O. La metabolización dentro de los tejidos vegetales y las plantas producen enzimas como la dehalogenasa y la oxigenasa, que ayudan a catalizar la degradación.
Fitoimmobilización	Provoca la sujeción y reducción de la biodisponibilidad de los contaminantes mediante la producción de compuestos químicos en la interfaz suelo-raíz, los que inactivan las sustancias tóxicas, ya sea por procesos de absorción, adsorción o precipitación.

Modificado de Delgado et al. 2011, Ortega et al. 2011

Una planta fitorremediadora realiza cualquiera de los mecanismos anteriores siguiendo tres fases: Absorción, excreción y desintoxicación de contaminantes.

- La absorción de contaminantes se realiza a través de las raíces y las hojas mediante las estomas y la cutícula de la epidermis (Watt y Evans 1999). Esta absorción ocurre en la rizodermis de las raíces jóvenes, que absorben los compuestos por ósmosis dependiendo de factores externos como la temperatura y el pH del suelo. Otros factores importantes que inciden en la penetración del contaminante son su peso molecular e hidrofobicidad que determinan que estas moléculas atraviesen las membranas celulares de la planta. Después de cruzar la membrana, los contaminantes son distribuidos a través de toda la planta (Harvey et al. 2002).
- Los contaminantes que se absorben por las raíces, se excretan vía hojas (fitovolatilización). Cuando las concentraciones de los contaminantes son elevadas, solo pequeñas fracciones (menos del 5 %) se excretan sin cambios en su estructura química.
- La desintoxicación de los compuestos orgánicos se lleva a cabo por la vía de la mineralización hasta dióxido de carbono.

1.3 ACACIA MANGIUM

La *Acacia mangium*, también conocida como teca australiana, pertenece a la familia Mimosaceae, es una especie de la parte nordeste de Australia, Papua Nueva Guinea y al este de Indonesia. Gracias a su rápido crecimiento y a la tolerancia a condiciones adversas en los suelos, ha venido sembrándose en plantaciones forestales con fines comerciales a lo largo de la franja tropical asiática, africana y americana. Fue introducida en América por Costa Rica en el año 1979 para un programa de reforestación por el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) del mismo país. A Colombia la especie se introdujo cerca del año 1995 con

propósitos ambientales de recuperación de suelos degradados, ha sido plantada en proyectos de reforestación en zonas como el bajo Cauca Antioqueño, sur de Córdoba, Magdalena medio y los Llanos Orientales. En los últimos años ha sido plantada en muchos países del mundo tropical, las características más relevantes de esta especie se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Características generales de la *Acacia Mangium*

Origen:	Noreste de Australia, Papúa Nueva Guinea y el este de Indonesia.
Descripción:	Árbol de rápido crecimiento, alcanza una altura de 15 - 20 m y un diámetro de tronco de 90 cm en 10 años aproximadamente. Las hojas en sus primeras etapas son compuestas y luego son reemplazadas por filodios cuya apariencia es la de una hoja entera con cuatro nervaduras longitudinales. El tronco puede estar sin follaje en más de la mitad. En sitios adversos puede ser un arbusto de menos de 10 m de alto. Inflorescencia, es una espiga poco densa, con flores blancas o cremas.
Toxicidad:	No Reportada
Limitaciones:	La especie ha presentado el síndrome de muerte descendente que inicia con amarillamiento progresivo.
Suelos:	pH 4,0 - 7,5 Se adapta bien a un amplio rango de suelos, crece rápidamente en sitios con bajo nivel de nutrientes, aun en suelos ácidos y degradados, con alto contenido de hierro y aluminio. No tolera excesiva humedad del suelo.
Altitud:	0 - 1.800 msnm.
Temperatura:	17 - 27 °C.
Precipitación:	600 - 3.500 mm/año.
Luz	No tolera sombra.

1.4 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

La implementación de plantas en procesos de fitorremediación ha sido ampliamente utilizada en el mundo, por tanto, se han realizado múltiples investigaciones en torno a la variedad y eficiencia de plantas que pueden ser utilizadas para este fin, teniendo en cuenta la localización geográfica del proceso de contaminación, las características del contaminante y el uso posterior de la planta. A continuación, se presentan algunas de las investigaciones usadas como referentes en el presente trabajo.

Remediación de suelos contaminados con mercurio utilizando Guarumo (Cecropia peltata).

En este trabajo se determinó la influencia del grado de contaminación, la aplicación de ácido cítrico y tiempo de crecimiento del guarumo, sobre la tasa de remoción de mercurio en suelo. Las muestras de suelo más y menos contaminadas se tomaron en el municipio de Barranco de Loba, sur de Bolívar. Después de 4 meses de crecimiento, los porcentajes de remoción estuvieron entre 15,7% y 33,7% debido a la capacidad del guarumo para acumular grandes cantidades del metal sin presentar efectos tóxicos considerables. La aplicación de ácido cítrico como agente quelante no tuvo influencia significativa en la acumulación del mercurio en las diferentes partes de la planta. Las variables de mayor influencia en las tasas de remoción del suelo son el tiempo de tratamiento y el grado de contaminación del suelo. Por lo anterior se concluyó, que el guarumo es una especie con capacidad fitorremediadora (Vidal et al. 2010)

Acumulación de mercurio (Hg) por caña flecha (Gynerium sagittatum) (Aubl) Beauv.

In vitro

En este estudio se evaluó, in vitro, la capacidad de acumulación de mercurio (Hg) que pueda poseer la caña flecha (*Gynerium sagittatum*) (Aubl) Beauv. como una alternativa viable para la rehabilitación de suelos contaminados. Se usó un diseño experimental de bloques al azar, un análisis de varianza para comparación de medias, una prueba de Tukey ($p \leq 0,05$) para la establecer las diferencias significativas entre los tratamientos, pruebas de normalidad (Kolmogorov-Smirnov) y test de homogeneidad de varianza de Bartlett. Los resultados muestran que la parte de la planta que presenta mayor acumulación es la raíz con 55,98 $\mu\text{g/g}$ HgT, seguida de los tallos-hojas con 14,84 $\mu\text{g/g}$ HgT, valores relacionados con el grado de concentración del metal en el medio de cultivo. En conclusión, in vitro esta planta acumula Hg debido a las altas concentraciones en sus tejidos sin afectar la viabilidad de las plantas (Ortega et al.2011).

Rehabilitación de suelos contaminados con mercurio estrategias aplicables en el área de Almadén

Este trabajo resume las distintas estrategias estudiadas para la rehabilitación y propone usos alternativos para los suelos contaminados en el distrito minero de Almadén (Ciudad Real, España). Consistió en una caracterización edafológica y botánica de la zona, un estudio del grado de contaminación de los suelos, y una selección de especies silvestres con resistencia al mercurio. En paralelo, se realizaron ensayos en condiciones controladas con suelos procedentes de la zona, utilizando también especies agrícolas. Tanto en las plantas silvestres como en las cultivadas se evaluó el factor de transferencia de Hg. Para definir el grado de contaminación, fue necesario evaluar la

biodisponibilidad de Hg en los suelos. En cuanto a los cultivos, tanto la berenjena de Almagro como varias legumbres (lenteja, garbanzo, altramuz) pueden consumirse sin alcanzar los niveles máximos permitidos de ingesta de Hg. Entre las forrajeras, el consumo de veza en verde no se recomienda por alcanzarse valores próximos al límite máximo admitido, aunque la semilla sí podría ser comercializada. Estos cultivos pueden ser una alternativa económica viable en la zona. Las especies vegetales silvestres estudiadas pueden emplearse en fitoestabilización y revegetación de las zonas más degradadas de Almadén, aunque no en fitoextracción (Millán et al. 2007).

Mecanismos de fitorremediación de suelos contaminados con Moléculas orgánicas xenobióticas

El objetivo de esta revisión fue mostrar a la fitorremediación como una opción tecnológica útil para la limpieza de suelos contaminados. Se realizó una revisión de los mecanismos que la planta utiliza, las interacciones que se llevan a cabo en el suelo entre planta, microorganismos y compuestos orgánicos xenobióticos para proponer soluciones a los problemas de la contaminación y la eventual recuperación de suelos (López et al. 2005).

Tolerancia y capacidad de fitorremediación de combustóleo en el suelo por seis especies vegetales

Se hizo un estudio en invernadero para evaluar la tolerancia y el crecimiento de tres especies de leguminosas (*Clitoria ternatea*, *Phaseolus coccineus*, *Cicer arietinum*) y tres gramíneas (*Brachiaria híbrido*, *Brachiaria brizantha* y *Panicum maximum*) en suelo contaminado con combustóleo, así como su capacidad de reducir el contenido de

hidrocarburos provenientes del mismo. A los 90 días, se evaluó la tolerancia, crecimiento, la población microbiana en la rizósfera y la degradación de combustóleo. *Phaseoluscoccineus* fue la única leguminosa con tolerancia y crecimiento en suelo contaminado; mientras que las tres gramíneas no fueron afectadas negativamente por la presencia del contaminante, aunque el híbrido de *Brachiaria* mostró mayor crecimiento. La población rizosférica de bacterias y hongos fue diferencialmente afectada por la presencia del contaminante en combinación con la planta. Sin embargo, la rizósfera de *P. coccineus* presentó mayor población microbiana en el suelo contaminado en comparación con las plantas restantes. La degradación de combustóleo evaluada cualitativamente por GC-MS, fue mayor en la rizósfera de *B.brizantha* y *P. maximum*. En contraste *P. coccineus* presentó una degradación similar a la observada en suelo contaminado sin planta (Sangabriel et al. 2006).

Bioindicadores de la calidad del suelo: herramienta metodológica para la evaluación de la eficacia de un proceso fitorremediador.

Este estudio consistió en la evaluación a través de un ensayo de fitoextracción a escala microcosmos, del efecto que tienen los indicadores biológicos de la calidad del suelo relacionados con la biomasa, actividad y biodiversidad de las comunidades microbianas. Como resultado del proceso, en suelos medianamente contaminados (SMC) hubo un aumento tanto de la biomasa microbiana como de la diversidad funcional de las comunidades microbianas heterótrofas cultivables. En las plantas crecidas en el suelo altamente contaminado (SAC), se observaron concentraciones de metal en la parte aérea superiores a las encontradas en aquellas crecidas en el SMC, el aumento de la funcionalidad microbiana no se observó en el SAC probablemente debido al efecto

tóxico producido por los altos niveles de metales aún presentes en dicho suelo después del ensayo. Por lo anterior se concluyó que estos indicadores poseen un enorme potencial como herramienta para monitorear la eficacia de un proceso fitorremediador, especialmente los procesos fitoextractores de suelos contaminados con metales (Garbisu et al. 2007).

Fitovolatilización y acumulación de mercurio en cuatro especies de plantas (ricinuscomunis, jatropha curcas, ciperuxferax, thaliageniculata) cultivadas en medio hidropónico en la Universidad de Córdoba

Este proyecto tuvo como objetivo evaluar la capacidad remediadora de mercurio por especies vegetales establecidas en dos minas en el sur de Bolívar y el alto San Jorge respectivamente. Para ello, se identificaron las especies silvestres e introducidas presentes, se determinó el contenido de mercurio en los suelos y la concentración de este en los órganos de las especies vegetales más abundantes en las zonas de mayor contaminación; además, se evaluó la cinética de acumulación de mercurio en dichas especies y la toxicidad del metal en condiciones de invernadero. Se colectaron 3 muestras de suelo, muestras de las especies dominantes para cuantificar el contenido total de mercurio en sus órganos (raíz, tallo y hoja). Para las dos minas, se reportan 45 especies, distribuidas en 24 familias; siendo Pterislongifolia con 28.319,1 ng/g y Tabebuia rosea con 8.280,99 ng/g, las especies que presentaron mayor acumulación total del metal en las minas Santa Cruz y El Alacrán respectivamente; asimismo, se presentaron diferencias entre la capacidad de acumulación en los órganos, siendo la raíz el órgano con mayor capacidad de acumular el metal, seguida de la hoja y por último el

tallo. En cuanto a la concentración de mercurio en el suelo, los resultados indicaron que esta fue mayor en la mina Santa Cruz (500 a 30500 ng/g) (Marrugo et al. 2012).

Evaluación de la capacidad acumuladora de mercurio del ají (*Aapsicum annuum*)

Esta investigación tuvo como objetivo evaluar la capacidad acumuladora de mercurio por parte de la planta ají, en suelos contaminados procedentes del corregimiento Mina Santa Cruz, sur de Bolívar, Colombia. Se obtuvo como resultado que los porcentajes de translocación de mercurio a las partes aéreas de las plantas fueron bajos tanto en suelo control como contaminados. Las concentraciones de mercurio total en raíces fueron mayores en comparación con tallos y hojas, concluyendo la baja capacidad de esta planta en el proceso de remediación de suelos contaminados con mercurio (Pérez et al. 2013).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la presente investigación se realizaron actividades de campo, laboratorio y oficina. Durante la fase de campo se hizo el reconocimiento y recorrido de la Universidad de Córdoba con el fin de realizar la recolección de muestras de suelo para la posterior siembra. En la fase de laboratorio se realizó el dopaje del suelo con mercurio para las distintas concentraciones; además, se realizó la siembra de las semillas de *Acacia Mangium* y una vez cumplido su periodo de latencia se realizó el seguimiento de las características morfológicas como longitud de la planta, número de hojas, abscisiones, número de hojas con clorosis y necrosis, para identificar posibles efectos tóxicos generados por los suelos contaminados con Hg. La fase de oficina, realizada paralelamente durante toda la investigación, consistió en la recopilación de bibliografía, análisis de muestras, análisis e interpretación de los resultados de laboratorio y elaboración de documentos finales.

A continuación, se describe la localización y características que enmarcan el área de investigación con la posterior descripción detallada de las actividades realizadas durante la investigación.

2.1 GENERALIDADES DEL INVERNADERO

Este estudio se desarrolló en un invernadero con condiciones controladas, en un área de 54 m², en las instalaciones de la Universidad de Córdoba localizado en la ciudad de Montería, la cual está situada entre los 09° 26` 16" y 07° 22` 05" de latitud norte, y los

74° 47` 43" y 76° 30` 01" de latitud oeste. El área donde se realizó la presente investigación se considera topográficamente plana, con una temperatura que oscila entre 18°C y 40°C, siendo la temperatura media 28°C, humedad relativa característica de 78% y precipitación de 1250 mm/año. El área utilizada fue de 4,5 metros de ancho y 0,75 metro de largo aproximadamente.

2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para llevar a cabo la investigación se realizó la siembra de plántulas teniendo en cuenta las condiciones mínimas necesarias para su desarrollo en un ambiente controlado. El procedimiento consistió en:

2.2.1 Germinación de semillas

El tratamiento pre-germinativo consistió en exponer las semillas a agua hirviendo durante 5 segundos, con lo cual se logró aumentar la germinación al 96 %; luego se hicieron germinar las semillas en una mezcla de suelo cernido en malla de 8 x 8 mm, y arena en proporción 19:1 en peso (100 g de suelo cada una en bolsas de polietileno para invernadero) de la Universidad de Córdoba sin hacerle adición de mercurio. Se esperó un mes a que se cumpliera su periodo vegetativo en las bolsas jardineras, para la formación de la radícula (pelos radiculares) y el crecimiento de la planta a una altura entre 4 y 8 cm con el brote de las primeras hojas, posteriormente fueron trasplantadas a materas con la respectiva mezcla de suelo contaminado con mercurio a diferentes concentraciones (Pérez et al. 2013, Rincón et al. 2003, FDA 1996).



Ilustración 1. Germinación de semillas de Acacia Mangium

2.2.2 Recolección del suelo

Las muestras de suelo se recolectaron de cinco puntos de la universidad de Córdoba, todos de uso agrícola; de los cuales se recolectó una muestra compuesta de aproximadamente un kilogramo para llevarla a analizar al laboratorio de suelos, con el fin de conocer algunas características químicas intrínsecas, tales como contenido de materia orgánica, pH y contenido nutrimental. Posteriormente, se homogenizo el contenido de los cinco puntos y se dispuso sobre una capa de plástico para ser secado por dos semanas. El suelo se molió para ser pesado y dopado.



Ilustración 2. Homogenización de suelo

2.2.3 Dopaje de suelo con mercurio

Se tomaron 5 kilogramos de suelo para cada unidad experimental, es decir 120 kg que se dividieron de manera inicial en cuatro canecas equitativamente, es decir, cada caneca quedó con 30 kg, en estas se preparó el suelo para alcanzar la concentración deseada de mercurio (1 μg , 2,5 μg y 5 μg , por gramo de suelo, junto a la muestra testigo).



Ilustración 3. Mezcla de suelo y solución de Hg para concentración de 1 $\mu\text{g}/\text{g}$

2.2.4 Siembra de plántulas

Se escogieron 24 plántulas de las ya establecidas en el invernadero, teniendo en cuenta que tuviesen características morfológicas similares con el fin de ser distribuidas aleatoriamente en el suelo control y el suelo sometido a dopaje con mercurio. Cada una de las plantas fue sembrada en 5 kg de suelo contenidos en materas de polietileno de alta densidad. Se ubicaron en el invernadero con un espacio ocupado de 4,5 metros de ancho por 0,75 metro de largo, en condiciones controladas, tratando de evitar la incidencia directa de gradientes de luz y temperatura ambiental, realizando el respectivo seguimiento fitosanitario a las plantas (Pérez et al. 2013)

	Nivel 1 (Testigo)			Nivel 2 (1 µgr)			Nivel 3 (2.5 µgr)			Nivel 4 (5 µgr)			
Mes 2	0,25m	0,25m	0,25m	0,25m	0,25m	0,25m	0,25m	0,25m	0,25m	0,25m	0,25m	0,25m	0,50 m
Mes 4	0,25m	0,25m	0,25m	0,25m	0,25m	0,25m	0,25m	0,25m	0,25m	0,25m	0,25m	0,25m	
				0,50 m			0,50 m			0,50 m			0,10 m

Ilustración 4. Esquema de plántulas en el invernadero.



Ilustración 5. Plántulas trasplantadas a materas con diferentes concentraciones de mercurio.

2.2.5 Seguimiento y cuidado plántulas

Cada planta fue regada cada dos días a las 6 de la mañana con 10 mL de agua del grifo. Se le adiciono 10 mL de urea disuelta en agua (100g de urea por 1 litro de agua) cumplido el primer y segundo mes de trasplante a cada una de las unidades experimentales por recomendación de un profesional en ingeniería agronómica. Lo anterior, para la fertilización de las plantas debido a su alta concentración de nitrógeno y su alta solubilidad por lo que se incorpora fácilmente al suelo donde es absorbido por la raíz de la planta y los microorganismos o retenido por algunas partículas coloidales del suelo (arcillas y materia orgánica), este proceso es de vital importancia después del trasplante de la planta para proporcionar los requerimientos nutricionales que requiere la planta para su crecimiento.

2.2.6 Observaciones a plántulas

Se realizó el seguimiento de las características morfológicas: longitud de planta, número de hojas, abscisiones, número de hojas con clorosis y necrosis con el fin de establecer alguna variación durante su crecimiento y desarrollo que pudiera estar relacionada con la exposición a las diferentes concentraciones de mercurio. Este seguimiento se realizó semanalmente a cada una de las unidades experimentales siguiendo el formato presentado en el anexo 1.



Ilustración 6. Toma de altura de plantas de *A. Mangium* en suelo testigo.

2.2.7 Toma de muestras

Se tomaron muestras en suelo y plantas discriminadas de la siguiente manera. Inicialmente se tomó una muestra compuesta de 1 kg de suelo de los 5 puntos de la Universidad de Córdoba para análisis de variables químicas y fertilidad, con el fin de establecer algunas características generales del suelo de estudio. De igual forma, se tomó una muestra de suelo correspondiente a cada una de las unidades experimentales (suelo dopado con Hg) para el análisis de mercurio total (HgT) inicial y final (0, 2 y 4 meses de crecimiento de la planta), en donde se extrajo la muestra de los primeros 15 centímetros de suelo, se retiraron las raíces encontradas en los 2 centímetros de la parte superior, para su posterior almacenamiento en bolsas debidamente selladas y rotuladas para su

envío al laboratorio y de esta forma determinar el porcentaje de remoción del contaminante del suelo.

Las muestras de plantas fueron tomadas cumplidos dos meses para el primer nivel y a los cuatro meses para el segundo nivel experimental. Se pesaron en balanza analítica en el laboratorio para luego ser secadas, nuevamente se pesaron con el fin de conocer el peso inicial y el peso seco de la planta. Finalmente, fueron enviadas en bolsas de polietileno de cierre hermético para ser conservadas hasta la realización del análisis de mercurio total (Pérez et al. 2013).

2.2.8 Análisis de laboratorio

A una muestra compuesta de aproximadamente un kilogramo de suelo, almacenadas en bolsas debidamente selladas y rotuladas se le hizo un análisis de fertilidad (pH, %MO, S, P, Ca, Mg, K, Na, CIC) en el laboratorio de suelos y agua de la Universidad de Córdoba para conocer el estado inicial del suelo en donde se trasplantaron las acacias. A las muestras de suelo sometido a dopaje y las muestras de plantas de los diferentes niveles experimentales se les realizó el análisis de mercurio total en el laboratorio de toxicología y gestión ambiental de la Universidad de Córdoba, utilizando metodologías de rutina inherentes a cada uno de estos laboratorios (Gonzalez y Paternina 2015, Ghaderian 2009).

Parámetro de Análisis	Método de Análisis		Norma de referencia
	Extracción	Cuantificación	
pH	pH relación 1:1 (suelo/agua)	Potenciométrico	NTC-5264
Materia orgánica (MO)	Walkey-Black	Titulación volumétrica	NTC-5403 Numerales 4.2 y 5.2
Azufre (S)	Monofosfato de calcio 0,008M	Espectroscopia UV-VIS	IGAC 6° Ed. 2006
Fósforo (P)	Bray II – modificado	Espectroscopia UV-VIS	IGAC 6° Ed. 2006
Ca, Mg, K, Na	Acetato de amonio 1,0 M a pH 7	Espectrofotometría de absorción atómica para Ca y Mg y espectrofotometría de emisión atómica para K y Na	IGAC 6° Ed. 2006
Al+H	KCl 1,0 M (Yuang)	Titulación volumétrica	NTC 5263
Capacidad de intercambio catiónico (CIC _c)	Acetato de amonio 1,0M a pH de 7	Suma de cationes	IGAC 6° Ed. 2006
Metales pesados (Hg,)	Espectrofotometría de Absorción atómica		EPA 7473

2.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

La investigación se trabajó en condiciones controladas sobre un diseño completo al azar con un arreglo factorial 2 X 4 donde el factor **A** es el tiempo (realizando mediciones en el mes 2 y mes 4) y el factor **B** corresponde a las concentraciones a las que se fue sometido el suelo (suelo a 1 µg/g, 2,5 µg/g y 5 µg/g, junto a la muestra testigo); para un total de 8 tratamientos, cada tratamiento con tres repeticiones, para un total de veinticuatro (24) unidades experimentales, constituidas por una planta cada una.

La muestra testigo consistió en un suelo el cual no se contaminó, con el propósito de realizar el diseño y establecer posibles diferencias en los rasgos fitotóxicos con las plantas expuestas al mercurio (Hg). El número de repeticiones (plantas) para cada una de las concentraciones fue de 3, por lo que se sembraron 24 (discriminadas en 12 para el mes 2 e igualmente 12 para el mes 4) plántulas de *Acacia Mangium* cada uno de los suelos de manera aleatoria.

Para el análisis estadístico de los datos se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de acuerdo al modelo planteado y pruebas de comparación de medias de Tukey para los casos donde se presentó interacción se realizó la respectiva descomposición. También, se realizó un análisis de regresión y análisis de correlación de Pearson (0,05). Se utilizó la herramienta de análisis de datos de Excel 2010 y el paquete estadístico SAS 9.1.3

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

El suelo utilizado en los diferentes ensayos experimentales, corresponde a una muestra compuesta por cinco sub muestras de suelo de uso agrícola en la Universidad de Córdoba donde se llevan a cabo diferentes cultivos con fines académicos y productivos. Estos suelos corresponden a sistemas pedológicos de poca evolución ubicados en el orden de inceptisoles del tipo Vertic Endoaquepts. Se define la presencia de un epipedón ócrico sobre un endopedón cámbico con características diagnósticas como alta saturación de bases y un régimen ústico. El suelo utilizado en la investigación se ubica en una planicie aluvial donde las variaciones topográficas son mínimas, lo que favorece la depositación de sedimentos finos y medios provenientes del plano aluvial del río Sinú.

En general, la granulometría está dominada por texturas moderadamente finas y finas, por lo que la clase textural predominante es franco arcillo limosa donde prevalece la formación de agregados. Este contenido de partículas moderadamente finas favorece los procesos de encharcamiento ocasionales, por tanto, son suelos con un drenaje natural imperfecto a pobre y nivel freático fluctuante.

Los resultados de laboratorio de forma general arrojaron para la muestra de suelo un pH de 6,63; según Soil Science Society of America se pueden catalogar como ligeramente neutros, la fertilidad del suelo en el campus universitario es variable de baja a alta, con contenidos de materia orgánica moderados (ver anexo 5)

Las características físicas y químicas del suelo juegan un papel muy importante en la movilización del mercurio, ya que este elemento puede aumentar con la formación de complejos con la materia orgánica y otros iones presentes en el suelo, así mismo, la textura y permeabilidad se relacionan con su acumulación en los horizontes superficiales. No obstante, su movilidad disminuye en condiciones reductoras debido a su precipitación en forma de sulfuro (Navarro et al. 2003, Reyes y Avendaño 2012). De acuerdo a lo anterior, se puede decir que las características químicas que presenta el suelo empleado, especialmente lo ligeramente neutro del mismo afecta la movilidad del metal, por tanto, la extracción por la planta a través de las raíces se ve limitado. En la ilustración 7 se observa que el Hg aumenta su disponibilidad en la solución de suelo a pH ácidos (por debajo de 5,5).

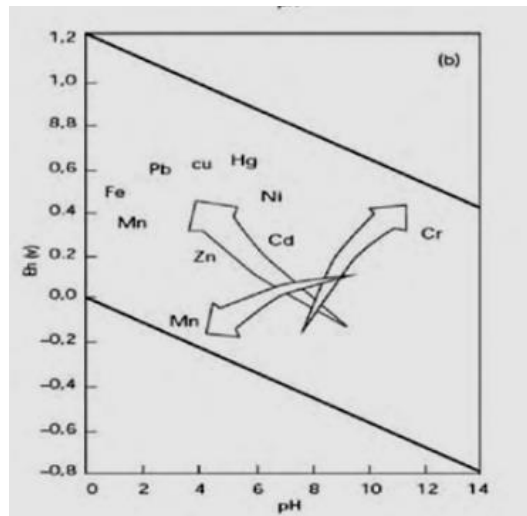


Ilustración 7. Tendencia en el incremento de la disponibilidad de metales pesados.

Tomado de Galán y Romero, 2008

Por otra parte, el manejo que se le hace al suelo de uso agrícola en la Universidad de Córdoba consiste en la aplicación continua de plaguicidas y fertilizantes. En la

actualidad no se conocen estudios para establecer el estado del suelo respecto a los efectos de la aplicación de este tipo de compuestos, sin embargo, en el desarrollo de la presente investigación se pudo identificar que en los ensayos testigos (no se le aplicó dosis de mercurio al suelo) se encontraron contenidos de Hg, en la segunda y tercera repetición las concentraciones respectivamente fueron de 105,98 µg/kg y 112,09 µg/kg.

3.2 CAPACIDAD DE EXTRACCIÓN LA *Acacia mangium* DE ACUERDO A SU PERIODO VEGETATIVO Y TIPO DE TRATAMIENTO.

Para analizar la capacidad de extracción de mercurio del suelo por la *Acacia mangium*, se tuvieron en cuenta factores como el periodo vegetativo de las plántulas y los tratamientos a los que fueron sometidas durante el tiempo de estudio. Con la finalidad de determinar cuál de estos factores tenían mayor relevancia al momento de la absorción del Hg por la planta.

Una vez sembradas y recolectadas las muestras de las plantas y del suelo tanto para el mes 2 como para el mes 4 se obtuvieron las siguientes concentraciones de mercurio total HgT que se observan en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados de concentraciones de mercurio en suelo y plantas.

IDENTIFICACIÓN DEL ENSAYO	MERCURIO TOTAL HgT EN SUELO (µg/kg)			MERCURIO TOTAL HgT EN PLANTA (µg/kg)	
	INICIAL	MES 2	MES 4	MES 2	MES 4
T0-1	134,09	*	85,2	*	41,8
T0-2	134,09	105,98	77,87	44,53	14,11
T0-3	134,09	112,09	*	37,22	
T1-1	1135,16	1032,95	1032,57	144,97	44,93
T1-2	1135,16	1135,46	1102,23	70,74	34,09
T1-3	1135,16	955,69	1088,46	80,71	42,34
T2-1	3206,12	2983,77	2713,92	38,73	12,79
T2-2	3206,12	2937,63	2777,62	45,58	50,97
T2-3	3206,12	2992,38	*	692,74	*
T3-1	6902,05	4462,41	5849,27	47,58	348,5
T3-2	6902,05	5253,92	5151,89	372,93	58,22
T3-3	6902,05	5255,46	5962,04	77,15	17,71

*muestras muertas; T0-1: repetición #1 con una concentración de 1 (µg/kg), T0-2:repetición #2 con una concentración de 1 (µg/kg),T0-3: repetición #3 con una concentración de 1 (µg/kg), T1-1: repetición #1 con una concentración de 2.5(µg/kg); T1-2: repetición #2 con una concentración de 2.5 (µg/kg);T1-3: repetición #3 con una concentración de 2.5 (µg/kg);T3-1: repetición #1 con una concentración de 5 (µg/kg5); T3-2: repetición #2 con una concentración de (µg/kg);T3-3: repetición #3 con una concentración de (µg/kg).

A los resultados presentados en la tabla 3 se le realizó el respectivo análisis de varianza, donde se relacionaron cada una de las variables analizadas en la investigación (concentraciones de mercurio en suelo y tejido vegetal, cantidad de hojas, altura de la planta, masa inicial y masa seca) con respecto al tiempo de desarrollo de las plantas (edad) y las concentraciones a las cuales fueron expuestas (dosis). Los resultados se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Análisis de varianza a las variables de estudio

FV	GL	Hg Suelo	Hg Planta	Hojas	Altura	Masa Inicial	Masa Seca
Dosis	3	31671936,94**	20695,94ns	29,93ns	21,92ns	1,21*	0,93*
Edad	1	70455,67ns	35621,76ns	70,04ns	1944,0**	35,82**	35,07**
Interacción	3	225624,20*	13991,49ns	84,60ns	72,08ns	4,35**	3,11**
Error	16	51693,26	26068,25	38,13	27,02	0,24	0,23
Total	23	4199575,27	24207,66	44,51	115,58	2,45	2,21

GL: grados de libertad; *: Diferencias significativas al 5% ($p \leq 0,05$); **: Diferencias significativas al 1% ($p < 0,01$); ns: Diferencias no significativas ($p > 0,05$).

En el análisis de varianza realizado previamente, se puede observar diferencias significativas (1% ($p < 0,01$)) entre algunas variables de estudios; por lo que se puede plantear que la concentración de mercurio total en el suelo está relacionada directamente con las cantidades de contaminante que se le esté agregando al mismo, ya sea por el manejo que recibe el suelo para cultivos o la dosis aplicada en los ensayos, esto no ocurre con la edad de las plantas, es decir, no existe diferencias significativas para las concentraciones de Hg en el suelo cuando se varía la edad de la planta. En el estudio realizado por Pérez et al. (2014) se encontró que el ají (*Capsicum annum*), se comporta totalmente diferente a la *Acacia mangium*, dado que el análisis de varianza mostro una diferencia significativa entre el tiempo de crecimiento (valor $p = 0,0001$) y la concentración de HgT en suelos (valor $p = 0,0016$) (Pérez et al. 2014). Comportándose totalmente diferente al presente estudio.

Se presentaron diferencias significativas al 5% ($p < 0,05$) con la masa inicial y seca de las plantas, este resultado indica que las concentraciones de mercurio absorbidas por la planta se ven relacionadas con la dosis de mercurio aplicada. Por otra parte, el tiempo guarda relación significativa con la altura de la planta y la masa inicial y seca de la misma, sin embargo, este comportamiento no se puede asociar directamente a la

absorción de mercurio por las plantas ya que es de esperarse que a medida que aumente la edad de las plantas estas variables (altura y masa) se modifiquen.

Tabla 5. Valores medios del efecto del tiempo sobre la concentración de mercurio en la planta.

Concentración de Hg en el suelo ($\mu\text{g/g}$)	Promedio
0,1	30,95 b
1,1	58,08 a
3,2	41,79 a
6,9	50,16 a

Letras similares en sentido vertical no difieren estadísticamente, según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Las plantas que crecieron en suelos con una concentración de $1,1\mu\text{g/g}$ y $6,9\mu\text{g/g}$ presentan una mayor concentración de mercurio acumulado, seguido de las plantas que crecieron en una concentración de $3,2\mu\text{g/g}$, aunque no con diferencias significativas; en cuanto a las plantas que crecieron en suelos con una concentración de $0,1\mu\text{g/g}$ se registra el menor promedio de absorción de mercurio, lo cual es de esperarse pues a estos suelos no se le aplicó ninguna dosis de mercurio, así que el mercurio extraído corresponde a mercurio residual de prácticas agrícolas. La variación en este comportamiento es contrario al presentado por el análisis realizado a *Gynerium sagittatum* en donde la concentración de mercurio total por parte de raíz, tallo y hojas fue mayor en los suelos que presentaron mayor contaminación ($75\mu\text{g/g}$) que en aquellos de menor concentración (Ortega et al. 2011).

En los ensayos experimentales, como se muestra en la tabla 5, el someter la planta a diferentes concentraciones de mercurio en el suelo no permite establecer una relación

directa de la capacidad de extracción de la misma. Porque si bien el movimiento de mercurio en la interacción suelo planta se da gracias a la absorción natural de nutrientes, este proceso depende de una variedad de factores como el tipo y composición de suelos, la genética de la planta, el comportamiento del metal, el estado redox y la especiación química (Poschenrieder y Barceló 1992). Factores como el pH del suelo (ligeramente neutro), el contenido de materia orgánica y el tiempo de exposición pudieron inhibir el proceso de extracción de mercurio por la planta, lo que coincide con los resultados obtenidos para la especie *Cecropia peltata* donde la baja extracción del metal se relacionó a factores de crecimiento y exposición (Vidal et al. 2010)

Por otra parte, es importante resaltar que posiblemente se presentan factores no controlados como lo es la contaminación cruzada, en la cual el mercurio que se volatiliza, sea directamente del suelo en forma de vapor o de las plantas con el mecanismo de fitovolatilización, por tanto, se puede alterar los valores promedio de mercurio absorbido encontrado en las plantas (Vidal et al. 2010).

En el grafico 1 se puede observar la relación entre las medias de las concentraciones de mercurio en el suelo (a,b) y los ensayos experimentales (T0, T1, T2 y T3), en este caso se confirma los resultados de la tabla 4 donde los contenidos de mercurio no guardan relación con las edad de las plantas, sin embargo, en el caso del ensayo T2 se puede apreciar una relación donde los contenidos de mercurio en el suelo son mayores para el mes 2 que para el mes cuatro. Esto puede deberse a que al mes 2 la planta aun no ha desarrollado completamente su sistema radicular, que según Poschenrieder y Barceló (1992) es el principal órgano de absorción y acumulación de metales pesados, de tal forma que el Hg continúa acumulado en la solución de suelo.

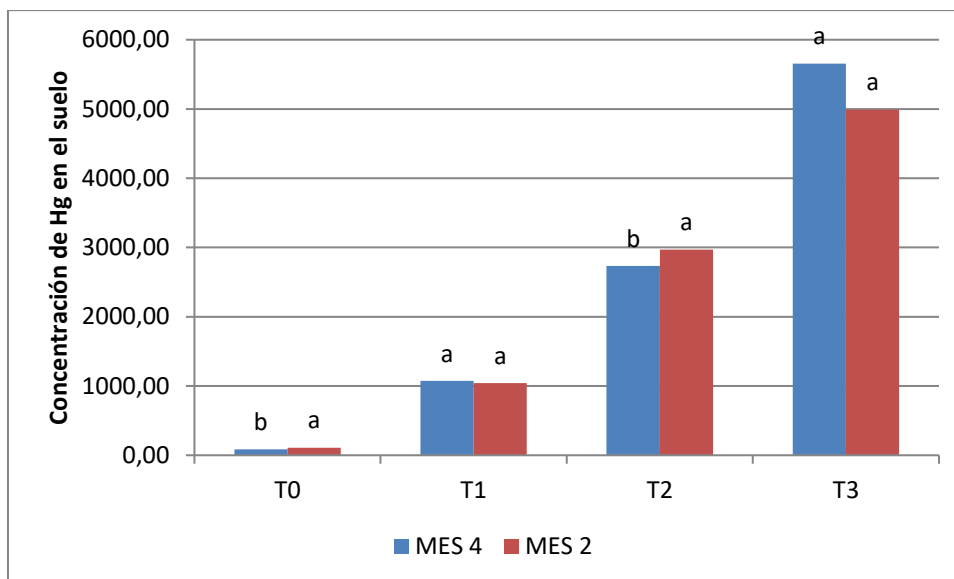


Grafico 1. Relación entre ensayos experimentales y concentración de mercurio en el Suelo. Letras iguales no hay diferencia y letras diferente hay diferencia significativa, según prueba de Tukey

En el grafico 2 se muestra la relación entre cada uno de los ensayos experimentales a diferentes edades con respecto a la masa inicial de las plantas, en este caso se observa relación en los ensayos T0, T1, y T3 y que se conserva la tendencia de predominancia para la edad de la planta de 4 meses. Es decir, que a medida que aumenta el desarrollo de la planta la masa de la misma también aumenta, al comparar estos resultados con los de la tabla 4 guarda una relación significativa con la dosis aplicada, no obstante para el ensayo T2 no se encontró que no hay diferencia significativa para las variables de estudio en los meses estudios; sin embargo los resultados no permiten establecer que la absorción de mercurio por la planta influye en la masa de esta, puede deberse, de acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo T2 a factores externos que inciden en la masa de las plantas como humedad o gradiente de luz.

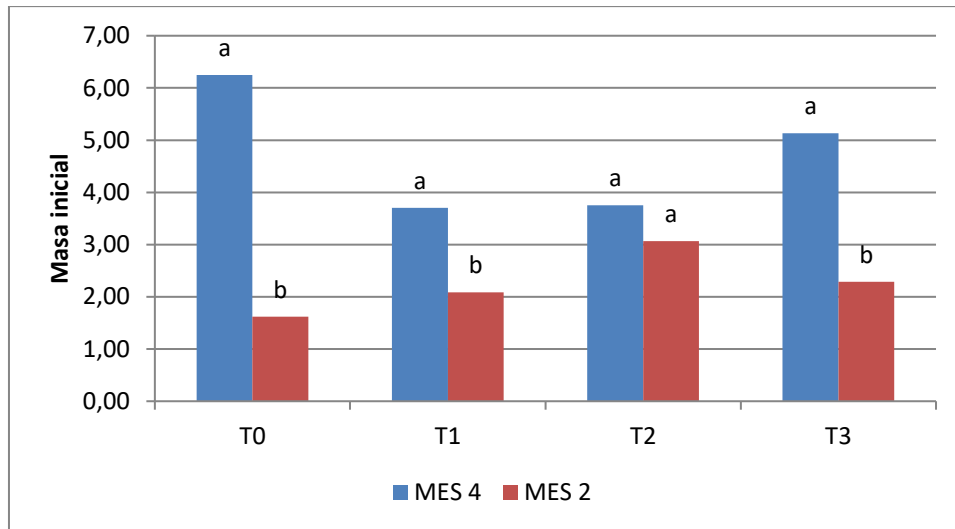


Grafico 2. Relación entre ensayos experimentales y masa inicial de la planta. Letras iguales no hay diferencia y letras diferente hay diferencia significativa, según prueba de Tukey

En el grafico 3 se observa una relación respecto a la masa seca de las plantas donde el ensayo experimental T2 no presentó relación entre las edades y las masas secas a la dosis de mercurio correspondiente.

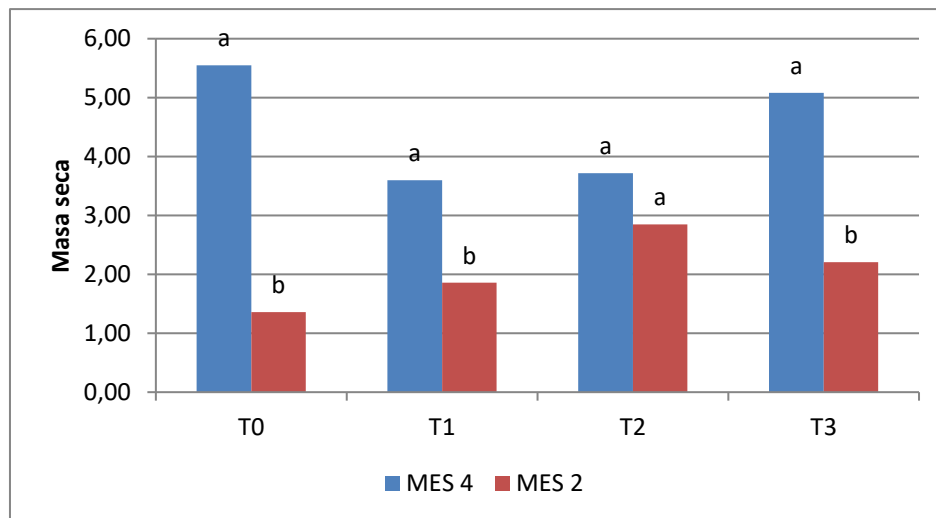


Grafico 3. Relación entre ensayos experimentales y masa seca de la planta. Letras iguales no hay diferencia y letras diferente hay diferencia significativa, según prueba de Tukey

A los datos obtenidos (tabla 3) se les aplicó el método de regresión lineal con el fin de establecer la relación lineal entre las variables cuantitativas analizadas. En la tabla 6 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 6. Resultados de Regresión.

FV	GL	Hg Suelo		Hg Planta		Hojas	
		Mes 2	Mes 4	Mes 2	Mes 4	Mes 2	Mes 4
Regresión	1	80567524,6**	82185839,4**	5316872,6*	18731973,3*	16673,2ns	13121028*
Error	10	223970,05	62138,5606	7749035,24	6407525,18	8279055,18	6968619,69
Total	11	7527929,55	7527929,55	7527929,55	7527929,55	7527929,55	7527929,55
FV	GL	Altura		Masa Inicial		Masa Seca	
		Mes 2	Mes 4	Mes 2	Mes 4	Mes 2	Mes 4
Regresión	1	2287037,9ns	369270,2ns	10551939*	991868,3*	15464255*	354797,3*
Error	10	8052018,71	8243795,48	7225528,53	8181535,67	6734296,97	8245242,77
Total	11	7527929,55	7527929,55	7527929,55	7527929,55	7527929,55	7527929,55

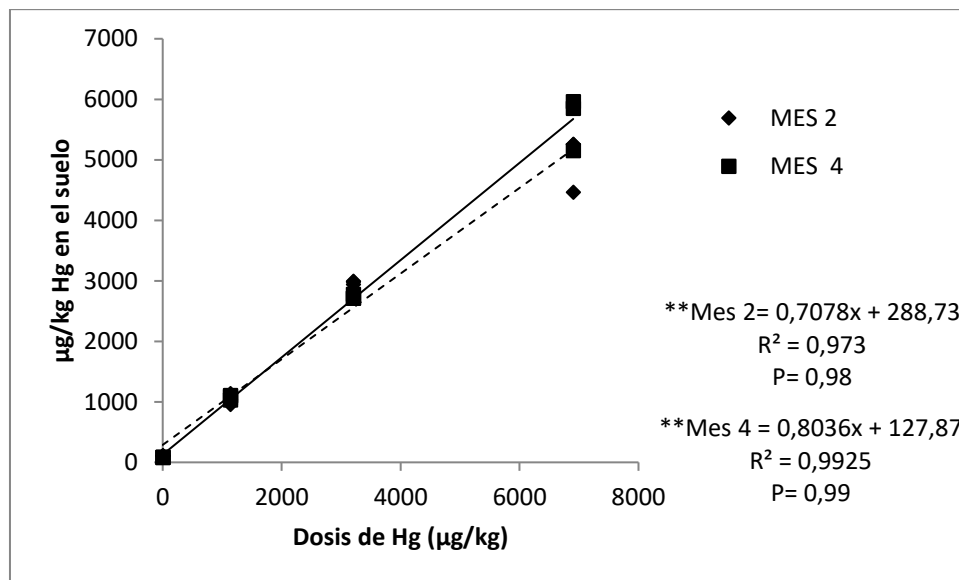


Gráfico 4. Análisis de regresión entre concentración de mercurio en el suelo y Hg aplicado a los ensayos.

En el gráfico 4 se puede apreciar la concentración de mercurio en el suelo en función de la dosis de mercurio aplicado, el cual se explica por un modelo lineal, siendo el mes 4 el

de mayor tasa de concentración en el suelo, el modelo que explica el comportamiento del mes 4 es $Y=0,8036X+127,87$ en comparación a la del mes 2 que presenta un modelo $Y=0,7078X+288,73$. Todo esto indica que las concentraciones de mercurio disponible en el suelo fueron mayores para el cuarto mes, lo cual podría explicarse en razón a la pérdida y renovación de hojas pequeñas que se presentó del mes 2 al mes 4 por lo que la extracción de elementos del suelo disminuye en base a los requerimientos nutricionales de la planta, además con la pérdida de hojas y posterior degradación en la superficie del suelo, como lo señala Vidal et al. (2010) el mercurio acumulado en ellas es reincorporado al suelo.

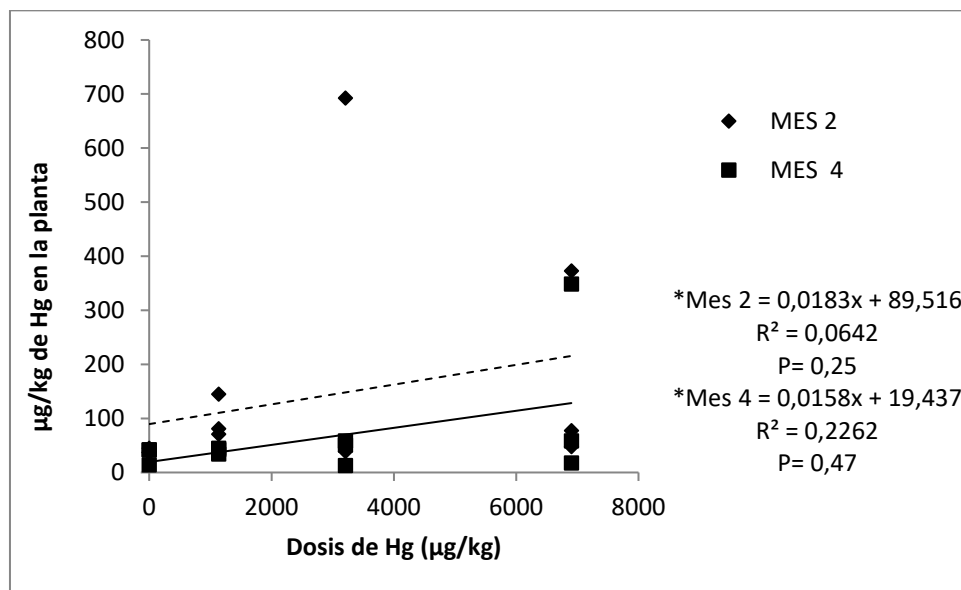


Gráfico 5. Análisis de regresión entre concentración de mercurio en las plantas y Hg aplicado a los ensayos.

De acuerdo al gráfico 5 no se presenta una correlación lineal significativa entre la concentración de mercurio aplicado a los ensayos y la concentración del metal en las plantas, sin embargo, la gráfica permite apreciar que las concentraciones Hg en las

plantas fueron mayores en el segundo mes. Esto se debe posiblemente a mecanismos de defensa por parte de la *Acacia mangium* como los presentados por el Guisante (*Pisum sativum* L.) y la hierba buena (menta) en donde las plantas eliminan el mercurio ya absorbido, como mecanismo de desintoxicación por medio de la fitovolatilización (Pérez et al. 2014); comportamiento similar al estudio realizado por Vidal (2009) en donde las plantas del mes dos presentan una mayor absorción de mercurio en relación a las del mes 4.

En este orden de ideas, según Poschenriender y Barceló (1992) también se puede decir que partir del mes 2 la planta comienza a implementar mecanismos de defensa o tolerancia como: a.) exclusión selectiva del metal del proceso de absorción, b.) excreción del metal, c.) excreción de compuestos por la raíz, que en la rizosfera reducen la disponibilidad del metal para la planta, d.) retención del metal en la raíz o en las vías de conducción, e.) inmovilización del metal en las vacuolas, f.) inmovilización del metal en la pared celular, g.) tolerancia a los metales de los sistemas enzimáticos.

En la tabla 7 se presentan los porcentajes de remoción de Hg por la planta de *Acacia mangium* de acuerdo a su periodo de crecimiento expuestas a las diferentes concentraciones del metal, estos resultados nos muestran la heterogeneidad en el comportamiento de la planta para extraer mercurio del suelo. En los ensayos realizados en el suelo testigo para el mes 4 se obtuvieron tasas de remoción del 36% y 42%, en este caso el suelo presentó una concentración mínima de mercurio atribuible al mercurio residual del manejo con químicos que se le hace al suelo para los cultivos que se adelantan en el campus universitario. La extracción de mercurio por *Acacia mangium*

obtuvo los mejores resultados de forma general en los dos primeros meses de crecimiento de la planta como se presenta en la tabla anterior. Las mayores tasas de remoción corresponden al ensayo experimental T3 en los dos primeros meses de desarrollo, en este caso las plantas de *Acacia mangium* lograron extraer más del 20% del mercurio presente en el suelo. Estos porcentajes son similares a los obtenidos en el estudio realizado con *Cecropia peltata*; aunque, cabe aclarar que no se puede definir la especie como hiperacumuladora dado que, los comparativos entre acumuladoras requieren de una valoración más completa que incluya la concentración de mercurio total, biodisponible, características edáficas y fisicoquímicas del suelo de cada especie. (Vidal et al. 2010, 2009).

Tabla 7. Tasa de remediación de *Acacia mangium*

IDENTIFICACIÓN DEL ENSAYO	MERCURIO TOTAL HgT EN SUELO (µg/kg)				
	INICIAL	MES 2	% DE REMOCIÓN MES 2	MES 4	% DE REMOCIÓN MES 4
T0-1	134,09			85,2	36%
T0-2	134,09	105,98	21%	77,87	42%
T0-3	134,09	112,09	16%		
T1-1	1135,16	1032,95	9%	1032,57	9%
T1-2	1135,16	1135,46	0%	1102,23	3%
T1-3	1135,16	955,69	16%	1088,46	4%
T2-1	3206,12	2983,77	7%	2713,92	15%
T2-2	3206,12	2937,63	8%	2777,62	13%
T2-3	3206,12	2992,38	7%		
T3-1	6902,05	4462,41	35%	5849,27	15%
T3-2	6902,05	5253,92	24%	5151,89	25%
T3-3	6902,05	5255,46	24%	5962,04	14%

En este orden de ideas, se puede decir que durante los dos primeros meses el porcentaje de extracción de mercurio del suelo fue mayor debido al desarrollo de la raíz. Según autores como Arcila (2011) en plantas jóvenes se encuentra una raíz pivotante bastante ramificada que predomina sobre las raíces laterales, comparando esto con lo expuesto por Poschenrieder y Baceló (1992) y Navarro et al. (2007) donde se establece que la raíz es el órgano prioritario de entrada y de acumulación de los metales a partir de allí el metal sigue la vía del xilema y posteriormente alcanzan las hojas en pequeñas proporciones alterando la estructura y la funcionalidad de las células fotosintéticas. De este modo, se podría decir que la planta en los dos primeros meses logro absorber mercurio y minerales necesarios para su desarrollo, sin embargo, del segundo al cuarto mes actuaron los mecanismos de resistencia de la planta como la exclusión selectiva del metal del proceso de absorción o la retención del metal en la raíz o vías de conducción.

Los análisis estadísticos presentados anteriormente de forma general indican que no existe una tendencia de *Acacia mangium* a absorber Hg a medida que esta crece, por el contrario, se nota una disminución en la acumulación de biomasa entre el mes 2 y el mes 4, por lo que no se puede establecer que la especie de *Acacia mangium* sea una planta apta para procesos de fitorremediación.

3.3 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE MERCURIO DENTRO DE SU PERIODO VEGETATIVO.

A las plántulas se les realizó seguimiento semanal durante su periodo vegetativo a los 2 y 4 meses, se identificaron el número de hojas grandes y pequeñas, hojas con clorosis o necrosis y la altura. En la tabla 8 se presentan los resultados finales de cada una de las variables a las cuales se les hizo seguimiento. Cabe resaltar que durante este tiempo no se identificó ninguna afectación fitotóxica sobre las hojas en ninguno de los casos (2 y 4 meses) (ilustración 8).



Ilustración 8. Ensayos de Acacia mangium a 5ug/g a los 2 meses (A) y 4 meses (B).

Tabla 8. Resultados de seguimiento a las plantas (2 y 4 meses)

Resultados de seguimiento a las plantas (ensayo 2 meses)							
Identificación	Altura (cm)	# hojas grandes	# hojas grandes clorosis	# hojas grandes necrosis	#hojas pequeñas	Peso inicial (g)	Peso seco (g)
T0-1*							
T0-2	12,5	0	0	0	23	1,6785	1,3878
T0-3	11	0	0	0	23	1,4987	1,2945
T1-1	20,5	0	0	0	25	2,9856	2,6677
T1-2	11	0	0	0	14	1,5674	1,4164
T1-3	12,5	0	0	0	25	1,7002	1,4956
T2-1	20,5	0	0	0	41	3,3408	3,3047
T2-2	20	0	0	0	33	3,2765	3,2301
T2-3	15	0	0	0	18	2,5765	2,0147
T3-1	14	0	0	0	22	2,5738	2,5474
T3-2	15,5	0	0	0	22	2,6076	2,4323
T3-3	11,5	0	0	0	20	1,6785	1,6425
Resultados de seguimiento a las plantas (ensayo 4 meses)							
Identificación	Altura (cm)	# hojas grandes	# hojas grandes clorosis	# hojas grandes necrosis	#hojas pequeñas	Peso inicial (g)	Peso seco (g)
T0-2	44	7	0	0	30	5,88	5,4262
T0-3*							
T1-1	34	7	0	0	21	4,0675	3,9615
T1-2	28	6	0	0	20	3,5678	3,4647
T1-3	27	4	0	0	20	3,4678	3,3735
T2-1	37	9	0	0	14	4,2365	4,2250
T2-2	26	4	0	0	22	3,5065	3,4619
T2-3*							
T3-1	35	17	0	0	8	4,6782	4,5602
T3-2	43	10	0	0	22	5,4567	5,4294
T3-3	39	9	0	0	27	5,2543	5,2472

*Tratamiento en donde las plantas se murieron

Se observa que para el mes 2 no se hubo hojas grandes ya que en el desarrollo de la *Acacia mangium* posterior a la germinación se presentan hojas falsas de menor tamaño

que posteriormente serán remplazadas por los filodios (peciolos aplanados) simples y de borde entero que fungen como hojas. En el mes 2 las plantas que presentan mayor número de hojas son las de la concentración de 2,5 $\mu\text{g/g}$, en comparación con los otros ensayos donde el número de hojas se comporta de manera similar. En el mes 4 se observa que las plantas que presentan mayor número de hojas son las de la muestra testigo o concentración 0, presentando una disminución regresiva a medida que va aumentando la dosis de Hg hasta la concentración de 2,5 $\mu\text{g/g}$, en las plantas de concentración de 5 $\mu\text{g/g}$ presenta un leve aumento en el número de hoja, sin embargo, este valor no es muy representativo dado que en general el número de hojas en las muestras del mes 4 presentan valores similares. Este comportamiento corresponde al proceso natural de regeneración de las hojas en la *Acacia Mangium*.

Por otra parte, se destaca que no hubo hojas con clorosis o necrosis a pesar de que las plantas estuvieron expuestas a mercurio en diferentes concentraciones, este comportamiento es contrario a lo propuesto por Poschenrieder y Barceló (1992) quienes establecen que este es uno de los primeros síntomas de fitotoxicidad antes de la senescencia y abscisión. Así mismo, estos autores plantean que el síntoma más característico en las plantas de la toxicidad por metales pesados es la reducción en el crecimiento, especialmente de raíces, aunque en la presente investigación se le hizo seguimiento a la altura de la parte aérea de la planta esta presentó un desarrollo normal.

En el grafico 6 se presentan los resultados para la correlación Pearson de las variables de numero de hojas respecto a la dosis de mercurio aplicada en cada ensayo, en este caso se observa que al segundo mes no existe una relación estadística significativa entre estas

variables. Sin embargo, cuando la evaluación se lleva al mes cuatro se nota que la tolerancia de las plantas a las concentraciones de Hg en el suelo disminuye.

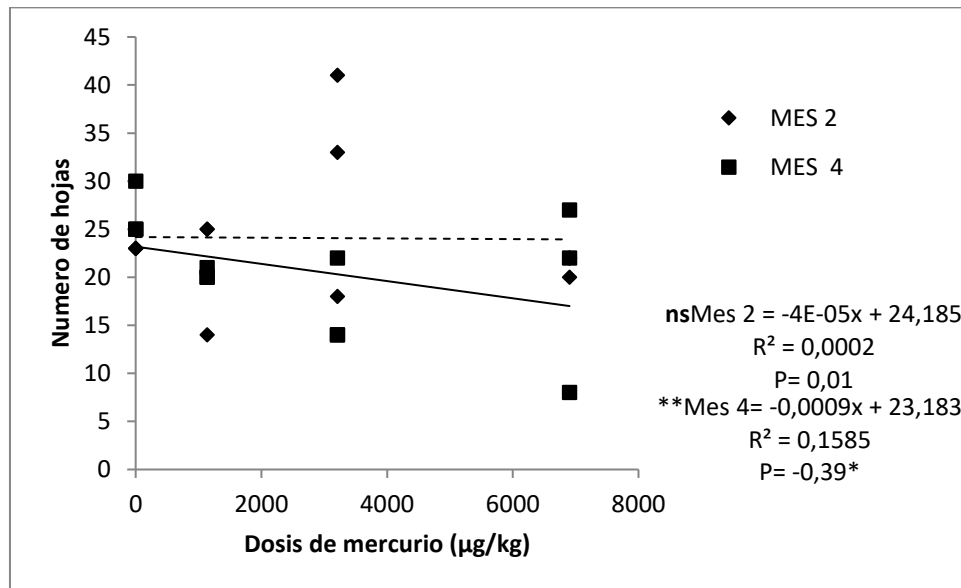


Gráfico 6. Análisis de regresión para número de hojas y dosis de Hg aplicada

El gráfico 7 muestra el resultado de la correlación entre la dosis de mercurio y la altura de las plantas, donde se observa que las variables analizadas no presentan una correlación significativa, es decir, el crecimiento longitudinal de planta es el mismo independiente de la concentración de Hg en el suelo. Sin embargo, se notan diferencias entre los tiempo de evaluación (2 y 4 meses) propios del crecimiento en altura natural del genotipo.

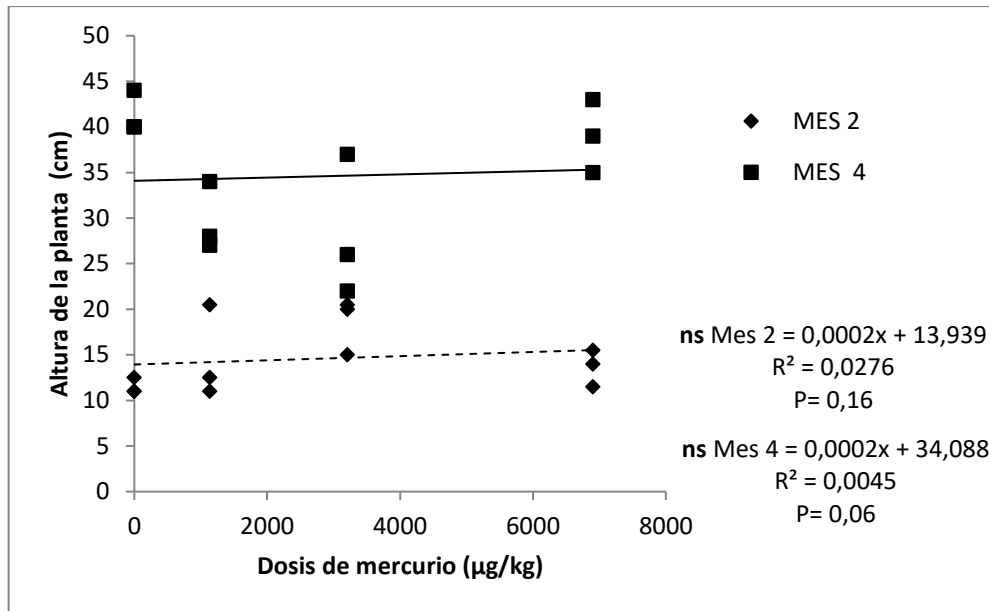


Grafico 7. Correlación de Pearson a altura de la planta Vs dosis de Hg aplicado

En el caso de las masa inicial y seca de la planta en los gráficos 8 y 9 se puede apreciar que no se encontraron relaciones significativas entre estas variables y la dosis de mercurio aplicada en los diferentes ensayos, sin embargo, el comportamiento de las masas de la planta entre si presentan relación, ya que la información inicial y final de masa se conserva, especialmente en el caso del ensayo T2 para el mes 4 donde la planta tuvo un compartimiento diferente, lo cual se puede explicar como una condición particular a la que pudo estar expuesta la planta poco notable durante el seguimiento. Además, como era de esperarse la masa de la planta aumento del mes 2 al 4, lo que concuerda con el desarrollo natural de la planta.

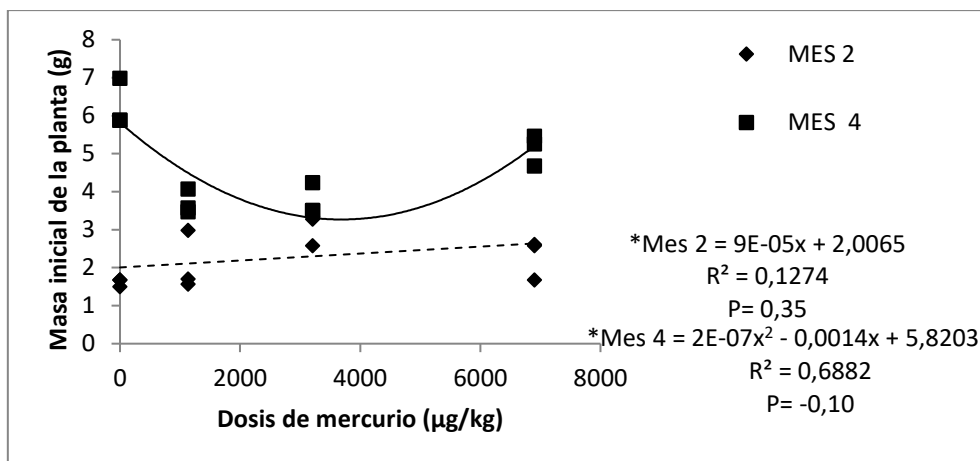


Gráfico 8. Análisis de regresión para masa inicial Vs Dosis de Hg aplicado

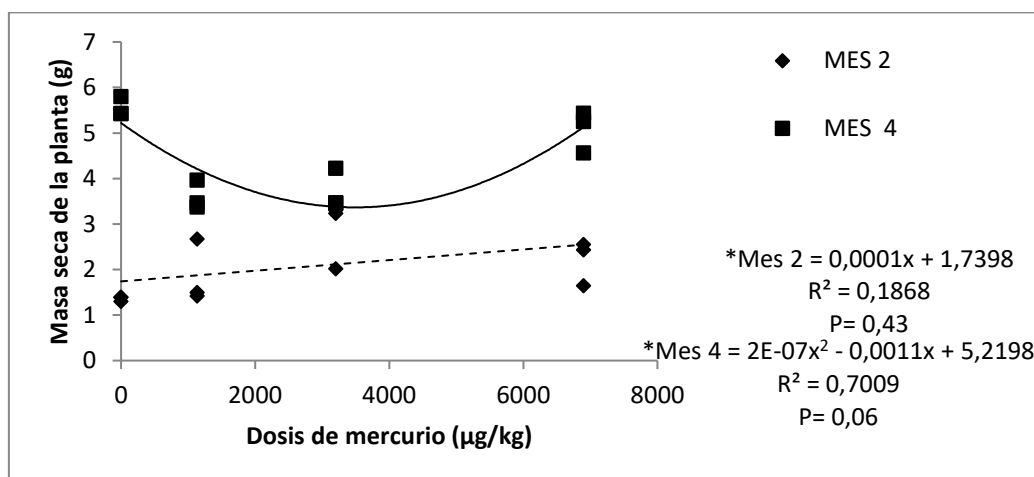


Gráfico 9. Análisis de regresión para masa seca Vs Dosis de Hg aplicado

Como se ha dicho anteriormente el comportamiento de las plantas de *Acacia mangium* sometidas al ensayo experimental se pudo ver influenciado por el corto periodo de exposición de las mismas al metal pesado, por la influencia de las características del suelo o las concentraciones del metal utilizadas, por tanto, no se presentaron síntomas visibles de fitotoxicidad durante el periodo de observación. Sin embargo, es de esperarse que los mecanismos de defensa de la planta se activen con un mayor tiempo de exposición al metal.

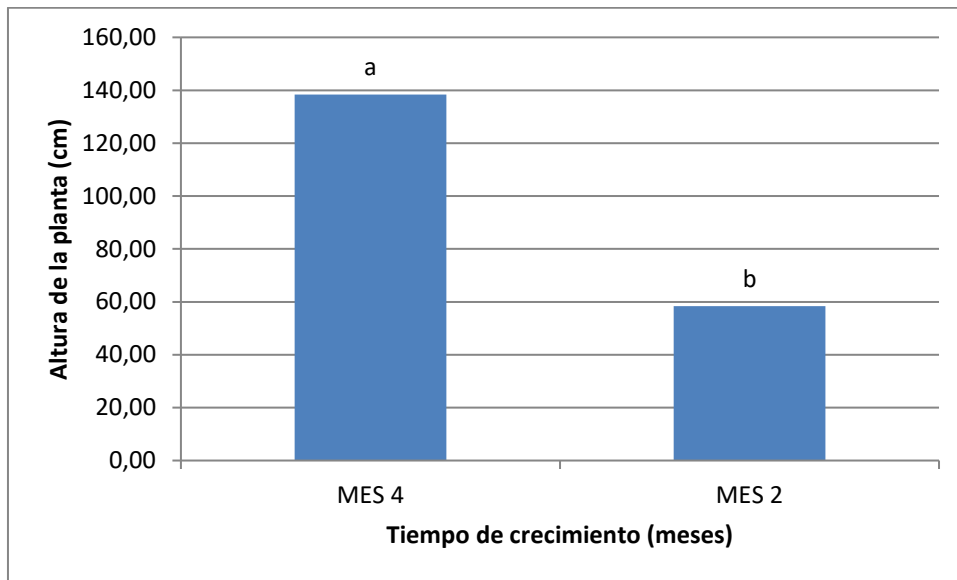


GRAFICO 10. Altura de las plantas Vs edades

En el grafico 10 se muestra la representación del análisis de media para la altura de la parte aérea de la planta a diferentes edades, en este caso como es de esperarse en el desarrollo natural de la planta las alturas son mayores al 4 mes del experimento, es decir, que contrario a lo descrito por diferentes autores la concentración de mercurio no está afectando la membrana o pared celular y por ende la extensibilidad y crecimiento de la planta o demás procesos fisiológicos visibles.

4. CONCLUSIONES

La presente tesis de pregrado ha permitido obtener un conocimiento importante respecto a la capacidad de la especie vegetal *Acacia mangium* como planta fitorremediadora de suelos contaminados por mercurio. La especie fue capaz de extraer mercurio del suelo en condiciones normales de laboratorio durante los meses de estudio, sin embargo, no se puede definir a la planta como una especie fitorremediadora puesto que no se encontraron relaciones significativas entre las dosis de mercurio aplicada a los ensayos y la absorción de mercurio por la planta a las diferentes edades (2 y 4 meses).

Las características del suelo utilizado en los ensayos experimentales como pH ligeramente básico y contenido moderado de materia orgánica no favorecieron la disponibilidad del metal para su absorción de la solución.

Las tasas de remoción de contaminante del suelo fueron bastante variadas, presentado los mejores resultados para los dos primeros meses de desarrollo de la planta, esto se puede relacionar directamente con la formación de la raíz.

El crecimiento de la planta no se ve afectada por las concentraciones de mercurio a las que estuvo expuesta en los diferentes ensayos, presentando un comportamiento normal en la altura y masa de las plántulas. Durante el seguimiento a las plantas no se presentó ningún caso de clorosis o necrosis, lo que indica la poca incidencia fitotóxica del mercurio en la planta.

5. RECOMENDACIONES

A continuación, se plantean algunas recomendaciones basadas en las limitaciones encontradas a lo largo del desarrollo de la presente investigación:

- Para la profundización del presente estudio se recomienda la ampliación de los sectores de muestreo, utilizando muestras de suelo de sectores afectados por la contaminación de suelo asociada a metales pesados y de diferente clase, para identificar el comportamiento de la planta ante diferentes características fisicoquímicas del suelo.
- De igual forma, se recomienda la ejecución del ensayo por un periodo superior a 4 meses para generar mayor información y de esta forma establecer mejor el comportamiento de la planta bajo estas condiciones.
- El seguimiento a la planta debe realizarse con una periodicidad de 1 mes para tener información más clara y veraz respecto al estado de la planta frente al proceso de extracción de mercurio.
- Se deben realizar análisis de las concentraciones de mercurio total en las diferentes partes de la planta como tallos, raíces y hojas para establecer cuál de ellas presenta una mayor acumulación de mercurio durante el proceso.
- Aumentar el número de unidades experimentales y realizar sus repeticiones en condiciones naturales (en campo) para establecer su comportamiento.
- Los resultados heterogéneos en cuanto a la relación de mercurio en el suelo y la planta a las diferentes edades, se puede deber a variables que no fueron objeto de

investigación en la tesis, como la incidencia de las características del suelo, la genética de la planta, factores externos como humedad y gradiente de luz.

6. BIBLIOGRAFÍA

Arcila, J. 2011. Crecimiento y desarrollo de la planta de café. Sistemas de producción de café en Colombia.

Argota G, Encinas M, Argota H, Iannacone J. 2014. Coeficientes biológicos de fitorremediación de suelos expuestos a. *The biologist* 12(1): 99-108.

Argumedo, M. Vergara, C. Vidal, J. Marrugo, J. 2015. 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. *Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud*, 47(2), 169-177.

Baird C. 1999. *Environmental Chemistry*. 2nd Ed. W.H. Freeman & Company.

Barcelo, J. Poschenrieder, C. 1992. Respuestas de las plantas a la contaminación por metales pesados. *Revista Suelo y Planta*. 2(1): 345-361.

Belmonte, F., Romero, A., Alonso F., Moreno J. y Rojo S. Afección de suelos agrícolas por metales pesados en áreas limítrofes a explotaciones mineras del sureste de España.

Papeles de geografía, ISSN: 0213-1781 (en línea) (51-52): 2010.
<https://digitum.um.es/jspui/bitstream/10201/14659/1/05-Belmonte%2045-54.pdf>

Acceso: 27 de septiembre de 2016.

Carpena, R. Bernal, M. 2007. Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Ecosistemas*, 16(2), 1-3.

Cartaya O, Reynaldo I, Peniche C, Garrido M . 2011. Empleo de polímeros naturales como alternativa para la remediación de suelos contaminados por metales pesados. *Int. Contam. Ambie* 27 (1): 41-46.

Che-Castaldo, J. Inouye, D. 2014. Field Germination and Survival of Experimentally Introduced Metal Hyperaccumulator *Noccaea Caerulescens* (Brassicaceae) Across a Soil Metal Gradient. *The American Midland Naturalist*, 171(2):229-245

Cobbett, C. Meagher, R. 2002. *Arabidopsis* and the genetic potential for the phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants. *The Arabidopsis Book*, e0032.

Delgadillo, A. González, C. Prieto, F. Villagómez, J. Acevedo, O. 2011. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(1): 597 – 612.

Desauziers, V., Castre, N., and Le Cloirec, P., 1997. Sorption of methylmercury by clays and mineral oxides. *Environ. Technol.* v 18, pp 1009-1018

Doadrio, A. 2014. Ecotoxicología y acción toxicológica del mercurio. *Anal. Real Acad. Nac. Farm.*, 70(4): 933-959

Dongsheng Che. Meagher, R. Rugh, C. Kim, T. Heaton, A. Merkle, S. 2006. Expression of organomercurial lyase in Eastern Cottonwood enhances organomercury resistance. *In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant*, 42(3):228-234.

Español, S. 2012. Contaminación con mercurio por la actividad minera. *Biomédica, Instituto Nacional de Salud*. 32(3), 309-311.

Fedesarrollo (2008). La minería en Colombia: Impacto socioeconómico y fiscal. Informe Final. Bogotá, D.C.: Fedesarrollo.

Fernández, R. Sierra, M. Villadóniga, M. Millán, R. 2010. Análisis de Parámetros Edáficos en Almadenejos. Comportamiento del Mercurio en el Sistema Suelo-Planta. CIEMAT. 32:(1): 25-39

Fitovolatilización y acumulación de mercurio en cuatro especies de plantas (*ricinus*comunis, *jatropha curcas*, *ciperuxferax*, *thaliageniculata*) cultivadas en medio hidropónico en la Universidad de Córdoba

Fundación de Desarrollo Agropecuario. 1996. Producción de Acacia, Eucalipto y Teca. www.fao.org/fileadmin/user_upload/training.../docs/1_Produccion%20Acacia.pdf.

Aceso 3 de Agosto de 2016.

Galán, A. y Romero, E. Contaminación de Suelos por Metales pesados. Contaminación de suelos por metales pesados. Revista de la sociedad española de mineralogía. ISSN: 1885-7264 (en línea), 10, 2008. http://www.academia.edu/11381423/Contaminaci%C3%B3n_de_Suelos_por_Metales_Pesados Acceso: 2 de febrero de 2017.

Garbisu, C. Becerril, J.M. Epelde, L. Alkorta, I. 2007. Bioindicadores de la calidad del suelo: herramienta metodológica para la evaluación de la eficacia de un proceso fitorremediador .Ecosistemas, vol. 16(2): 1-6

Ghaderian, S. Movahedi, M. Ghasemi, R. 2009. Uptake and Accumulation of Cobalt by *Alyssum bracteatum*, an Endemic Iranian Ni Hyperaccumulator. *Northeastern Naturalist*, 16(5):131-138.

Goana, X. 2004. El mercurio como contaminante global: Desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente. Doctorado en química. Universidad Autónoma de Barcelona, España.

González, I. Mueña, V. Cisternas, M. Neaman, A. 2008. Acumulación de cobre en una comunidad vegetal afectada por contaminación minera en el valle de Puchuncaví, Chile central. *Revista chilena de historia natural*, 81(2), 279-291.

Gonzalez, M; Paternina, J. 2015. Identificación de los efectos de la actividad aurífera sobre suelos aluviales adyacentes a la quebrada Valdés-mina el Alacrán. Tesis Ingeniero Ambiental, Universidad de Córdoba, Montería.

Harvey, P. Campanella, B Castro, P. Harms, H. Lichtfouse, E. Schäffner, A. Smrcek, S. Werck-Reichhart, D. 2002. Phytoremediation of Polyaromatic Hydrocarbons, Anilines and Phenols. *Environmental Science and Pollution Research* 9: 29-47.

Kumar, V. Sharma, A. Narasimha, B. Bhaskar, H. Aswathanarayana, G. 2006. *Agrobacterium rhizogenes* mediated genetic transformation resulting in hairy root formation is enhanced by ultrasonication and acetosyringone treatment. *Electronic Journal of Biotechnology*, 9(4), 0-0.

López, S. Gallegos, M. Flores, L. Rojas, M. 2010. Mecanismos de fitorremediación de suelos contaminados con moléculas orgánicas xenobióticas. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 21(2), 91-100.

Marrugo, J. Benitez, L. Olivero, J. 2008. Distribution of Mercury in Several Environmental Compartments in an Aquatic Ecosystem Impacted by Gold Mining in Northern Colombia. Archives of Environmental Contamination and Toxicology 55(1): 305- 316.

Marrugo, J. Verbel, J. Ceballos, E. Benitez, L. 2008. Total mercury and methylmercury concentrations in fish from the Mojana region of Colombia. Environmental Geochemistry and Health. 30(1) : 21-30

Martínez, J. Uribe, A. 2015. El Mercurio y la contaminación por actividad extractiva. Revista Ontare, 3(1), 55-76.

Martinez-Bustamante, E. . Crecimiento, Desarrollo y Potencial productivo de la Papaya (Caripa papaya L.) Variedad Hawaiana en el Caribe Colombiano. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. 1998.

Millán, R. Carpena, R. Schmid, T. Sierra, M. Moreno, E. Peñalosa, J. Esteban, E. 2007. Rehabilitación de suelos contaminados con mercurio: estrategias aplicables en el área de Almadén. Revista Ecosistemas, 16(2): 56-66

Navarro, A., Mendoza, J. y Domenech, L. Movilización de Hg en suelos contaminados por actividades mineras. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), 2003. Proyecto de investigación del Ministerio de ciencia y tecnología y Centro de investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas.

Navarro, A., Mendoza, J. y Domenech, L. Movilización de Hg en suelos contaminados por actividades mineras. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), 2003. Proyecto de

investigación del Ministerio de ciencia y tecnología y Centro de investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas.

Navarro, J. Aguilar, I. López, J. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. Revista 16 (2): 10-25. <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=488>. Acceso: 7 de Julio 2016.

Olivero, J. 2010. Efectos de la minería en Colombia sobre la salud humana. Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) disponible en: http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/forum_topic/3655/files/efectos_mineria_colombia_sobre_salud_humana.pdf.

Olivero, J., & Johnson, B. (2002). El lado gris de la minería del oro: La contaminación con mercurio en el norte de Colombia. Universidad de Cartagena, Cartagena DC, Colombia.

Olivero-Verbel J., Caballero-Gallardo K. y Marrugo-Negrete J. 2011. Relationship between localization of gold mining areas and hair mercury levels in people from Bolivar, north of Colombia. Biol. Trace Elem. Res. 144, 118-132.

OMS y PNUMA. 2008. Guidance for Identifying Populations at Risk from Mercury Exposure. Ginebra (Suiza).

Ortega, H. Benavides, A. Alonso, R. Zermeño, A. 2011. Fitorremediación De Suelos Contaminados Con Metales Pesados. http://abenmen.com/a/Nutricion_Vegetal-4.pdf. Acceso 25 de Julio de 2016.

Ortiz, B. Sanz, J. Dorado, M. Villar, S. 2007. Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Informe de Vigilancia Tecnológica. Universidad de Alcalá. Dirección General de Universidades e Investigación. España.

Ortiz, H. Valdez, R. Arreola, A. Flores, A. López, B. 2009. Fitoextracción de plomo y cadmio en suelos contaminados usando quelite (*Amaranthus Hybridus* L.) Y micorrizas. Revista Chapingo Serie Horticultura. 15(2), 161–168.

Oyarzun, R., Higuera, P. y Lillo, J. 2011. Minería ambiental: Una introducción a los impactos y su remediación. Ediciones GEMM, España, p57-61, p91-123.

Perez, H., Vidal, J. Marrugo, J. 2014. Evaluación de la capacidad acumuladora de mercurio del ají (*Capsicum annum*). Journal of Public Health, 16(6), 897.

Programa de las naciones unidas para el medio ambiente – PNUMA. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible– MADS. (2012). Sinopsis de la minería aurífera artesanal y de pequeña escala.

Qixing, Z. Zhang, C. Zhineng, Z. Weitao, L. 2011. Ecological Remediation of Hydrocarbon Contaminated Soils with Weed Plant. Journal of Resources and Ecology, 2(2):97-105.

Reyes, M. Y Avendaño, G. Estudio ambiental sobre el riesgo ecológico que representa el plomo presente en el suelo. Revista EAN, ISSN: 0120-8160, (en línea) (72), 2012. <http://journal.ean.edu.co/index.php/Revista/article/view/568/556>. Acceso: 19 de agosto de 2016.

Rincón, J. Gallardo, J. Leal, M. Rojas, J. 2003. Efecto de la relación calcio:fósforo en el suelo sobre el crecimiento y nodulación de plantas jóvenes de *Acacia Mangium* (willd). *Revista Bioagro* 15(2): 97-105.

Sangabriel, W. Ferrera, R. Trejo, D. Mendoza, M. Cruz, S. López, C. Delgadillo, J. Alarcón, A. 2006. Tolerancia y capacidad de fitorremediación de combustóleo en el suelo por seis especies vegetales. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 22 (2) 63-73

Serrano, M. Fitorremediación: Una alternativa para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos (CD), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia (2011).

Swain, E. Jakus, P. Frank, G. Maxson, P. Pacyna, J. Samuel J. Spiegel, A. Veiga, M. 2007. Socioeconomic Consequences of Mercury Use and Pollution. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 36(1):45-61.

Swain, E. Jakus, P. Rice, G. Lupi, F. Maxson, P. Pacyna, J. Penn, A. Spiegel, S. Veiga, M. 2007. Socioeconomic Consequences of Mercury Use and Pollution. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 36(1):45-61.

USDA. 2010. Claves para la Taxonomía de Suelos. 11ª edición. Soil Survey Staff. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio de Conservación de Recursos Naturales.

USDA: Natural Resources Conservation. 1998. Soil Quality Indicators: pH [en línea]. Internet, http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_052208.pdf. [27 Junio 2015]

Vidal, J. 2009. Capacidad del guarumo (*Cecropia Peltata*) como planta Fitorremediadora de suelos contaminados con mercurio. Magíster en ciencias ambientales, Sistema de Universidades Estatales del Caribe Colombiano Suecaribe, Línea De Medio Ambiente, Salud y Cultura, Sede Universidad de Cartagena

Vidal, J. Marrugo J. Jaramillo, B. Perez, L. 2010. Remediation of contaminated soil with mercury using the guarumo (*Cecropia peltata*) trees. *Ingeniería y Desarrollo*, (27), 113-129.

Watt, M. Evans, J. 1999. Proteoid roots. Physiology and development. *Plant Physiology*, 121(2), 317-323.

Weinberg, J. Persistentes, O. 2010. Introducción a la Contaminación por Mercurio para las ONG. Red Internacional de Eliminación de los Contaminantes Orgánicos persistentes (IPEN) Disponible en: <http://www.ipen.org/ipenweb/documents/book/ipen%20mercury%20booklet%20spanish.pdf>

ANEXOS

ANEXO 1. Resultados Generales de los ensayos experimentales

Resultados generales												
	Ensayo a 4 meses	MERCURIO TOTAL - T-Hg (µg/kg)		MERCURIO TOTAL - T-Hg (µg/kg) Planta	Altura (cm)	# hojas grandes	# hojas grandes clorosis	# hojas grandes necrosis	#hojas pequeñas	W.inicial	W.seco	
		Suelo										
Muestra testigo	T0-1	85,2		41,8	58	11	0	0	25	6,9875	5,7955	
	T0-2	77,87		14,11	44	7	0	0	30	5,88	5,4262	
	T0-3											
Concentración 1	T1-1	1032,57		44,93	34	7	0	0	21	4,0675	3,9615	
	T1-2	1102,23		34,09	28	6	0	0	20	3,5678	3,4647	
	T1-3	1088,46		42,34	27	4	0	0	20	3,4678	3,3735	
Concentración 2	T2-1	2713,92		12,79	37	9	0	0	14	4,2365	4,2250	
	T2-2	2777,62		50,97	26	4	0	0	22	3,5065	3,4619	
	T2-3											
Concentración 3	T3-1	5849,27		348,5	35	17	0	0	8	4,6782	4,5602	
	T3-2	5151,89		58,22	43	10	0	0	22	5,4567	5,4294	
	T3-3	5962,04		17,71	39	9	0	0	27	5,2543	5,2472	

Resultados generales

	Ensayo a 2 meses	MERCURIO TOTAL - T-Hg (µg/kg)		MERCURIO TOTAL - T-Hg (µg/kg)	Altura (cm)	# hojas grandes	# hojas grandes clorosis	# hojas grandes necrosis	#hojas pequeñas	W.inicial	W.seco
		Suelo	Planta								
	T0-1										
Muestra testigo	T0-2	105,98	44,53	44,53	12,5				23	1,6785	1,3878
	T0-3	112,09	37,22	37,22	11				23	1,4987	1,2945
Concentración 1	T1-1	1032,95	144,97	144,97	20,5				25	2,9856	2,6677
	T1-2	1135,46	70,74	70,74	11				14	1,5674	1,4164
	T1-3	955,69	80,71	80,71	12,5				25	1,7002	1,4956
Concentración 2	T2-1	2983,77	38,73	38,73	20,5				41	3,3408	3,3047
	T2-2	2937,63	45,58	45,58	20				33	3,2765	3,2301
	T2-3	2992,38	692,74	692,74	15				18	2,5765	2,0147
Concentración 3	T3-1	4462,41	47,58	47,58	14				22	2,5738	2,5474
	T3-2	5253,92	372,93	372,93	15,5				22	2,6076	2,4323
	T3-3	5255,46	77,15	77,15	11,5				20	1,6785	1,6425

ANEXO 2. Porcentajes de remoción de Hg total.

MERCURIO TOTAL HgT EN SUELO (µg/kg)						
IDENTIFICACIÓN DEL ENSAYO	INICIAL	MES 2	% de remoción	MES 4	% de remoción	Diferencia de remoción
T0-1	134,09	*		85,2	36%	
T0-2	134,09	105,98	21%	77,87	42%	21%
T0-3	134,09	112,09	16%	*		
Promedio de remoción concentración testigo						
T1-1	1135,16	1032,95	9%	1032,57	27,33	0%
T1-2	1135,16	1135,46	0%	1102,23	3%	3%
T1-3	1135,16	955,69	16%	1088,46	4%	-12%
Promedio de remoción concentración 1						
T2-1	3206,12	2983,77	7%	2713,92	5%	-3%
T2-2	3206,12	2937,63	8%	2777,62	13%	8%
T2-3	3206,12	2992,38	7%	*		5%
Promedio de remoción concentración 2						
T3-1	6902,05	4462,41	35%	5849,27	9,33	-20%
T3-2	6902,05	5253,92	24%	5151,89	25%	1%
T3-3	6902,05	5255,46	24%	5962,04	14%	-10%
Promedio de remoción concentración 3						
			28%		18%	

ANEXO 3. Concentración de Hg total en plantas a diferentes edades

IDENTIFICACIÓN DEL ENSAYO	MERCURIO TOTAL HgT EN PLANTA (µg/kg)		Diferencia
	MES 2	MES 4	
T0-1	*	41,8	
T0-2	44,53	14,11	30,42
T0-3	37,22		37,22
Promedio de acumulación testigo	27,25	18,64	
T1-1	144,97	44,93	100,04
T1-2	70,74	34,09	36,65
T1-3	80,71	42,34	38,37
Promedio de acumulación concentración 1	98,81	40,45	
T2-1	38,73	12,79	25,94
T2-2	45,58	50,97	-5,39
T2-3	692,74		692,74
Promedio de acumulación concentración 2	45,58	31,88	
T3-1	47,58	348,5	-300,92
T3-2	372,93	58,22	314,71
T3-3	77,15	17,71	59,44
Promedio de acumulación concentración 3	77,15	58,22	

ANEXO 4. Seguimiento semanal de altura a ensayos experimentales.

T0 2 meses			
Fecha	R1	R2	R3
21/03/2016	4	4,5	4,5
28/03/2016	4	5	5
04/04/2016		5	5
11/04/2016		5	6
18/04/2016		6	7
25/04/2016		7	8
02/05/2016		9	9
09/05/2016		11	10
18/05/2016		12,5	11

T1 2 meses			
Fecha	R1	R2	R3
21/03/2016	6	4	5,5
28/03/2016	7	4,5	6
04/04/2016	8	5	6
11/04/2016	10	6	7
18/04/2016	11,5	7	8
25/04/2016	13	8	9
02/05/2016	15,5	9	10
09/05/2016	18	10	11
18/05/2016	20,5	11	12,5

T2 2 meses			
Fecha	R1	R2	R3
21/03/2016	5,5	5	3,5
28/03/2016	6	7	4,5
04/04/2016	6,5	9,5	6,5
11/04/2016	8	11	8
18/04/2016	11	13	8,5
25/04/2016	14	15	11
02/05/2016	16	16,5	12
09/05/2016	18	18	13,5
18/05/2016	20,5	20	15

T3 2 meses			
Fecha	R1	R2	R3
21/03/2016	4	4	3
28/03/2016	5	6,5	3,5
04/04/2016	7	7,5	5,5
11/04/2016	8	8,5	5,5
18/04/2016	8,5	9,5	5,5
25/04/2016	9	10,5	6,5
02/05/2016	10,5	12	8
09/05/2016	12	13,5	9,5
18/05/2016	14	15,5	11,5

T0 4 meses			
Fecha	R1	R2	R3
18/01/2016	5	4,5	6
25/01/2016	5	4,5	6,1
01/02/2016	5,5	4,6	6,3
08/02/2016	6,5	5	6,5
15/02/2016	8	5,5	6,7
22/02/2016	9	6,5	6,9
29/02/2016	10	7,5	7
07/03/2016	11	8	7
14/03/2016	13	10	7
21/03/2016	15	12	
28/03/2016	18	15	
04/04/2016	23	19	
11/04/2016	28,5	22,5	
18/04/2016	36	29	
25/04/2016	43	34,5	
02/05/2016	49	39	
09/05/2016	55	41	
18/05/2016	58	44	

T1 4 meses			
Fecha	R1	R2	R3
18/01/2016	7	9	11
25/01/2016	7	9	11,2
01/02/2016	7,1	9,2	11,3
08/02/2016	7,2	9,5	11,4
15/02/2016	7,3	9,8	11,4
22/02/2016	7,4	10,3	11,5
29/02/2016	7,5	10,5	11,5
07/03/2016	7,5	10,5	12
14/03/2016	7,7	11,5	12,5
21/03/2016	7,9	12	13
28/03/2016	8	13	14
04/04/2016	8,5	13,5	14,5
11/04/2016	11	14,5	15,5
18/04/2016	15	17,5	17
25/04/2016	19	20	19
02/05/2016	24	23	23
09/05/2016	29	26	25
18/05/2016	34	28	27

T2 4 meses			
Fecha	R1	R2	R3
18/01/2016	10,5	9	7
25/01/2016	11,5	9,4	7
01/02/2016	11,8	9,5	
08/02/2016	12,2	9,6	
15/02/2016	12,5	9,7	
22/02/2016	12,8	9,8	
29/02/2016	13	10	
07/03/2016	13,5	10,5	
14/03/2016	13,5	10,7	
21/03/2016	14	11	
28/03/2016	14,5	11	
04/04/2016	16	11,5	
11/04/2016	19	13	
18/04/2016	22,5	15	
25/04/2016	28	17	
02/05/2016	30	19	
09/05/2016	34	21	
18/05/2016	37	26	

T3 4 meses			
Fecha	R1	R2	R3
18/01/2016	12	8	9
25/01/2016	12	9,5	9,5
01/02/2016	12,5	10	10,5
08/02/2016	13	11	12
15/02/2016	13,3	12	13
22/02/2016	13,5	12	14
29/02/2016	15	13	16
07/03/2016	17	14	17
14/03/2016	19	15	18
21/03/2016	20,5	16	19
28/03/2016	22	17	20
04/04/2016	24	18	22
11/04/2016	28	23	24
18/04/2016	31	26,5	27,5
25/04/2016	34	30	31
02/05/2016	34	35	34
09/05/2016	35	39	36
18/05/2016	35	43	39

ANEXO 5. Resultados de laboratorio de suelos



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA		CÓDIGO FLSA-011
INFORME DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO		VERSION:01
		EMISION: 20-09-2010
		PÁGINA: 1 DE 1

LABORATORIO DE SUELOS Y AGUAS	UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA, Cra 6 #76-103 vía Cerebé	Tel: 7818056
PROPIETARIO: ALFONSO BUELVAS	CORREGIMIENTO:	Email: labsuelosyaguas@correo.unicordoba.edu.co
FINCA: UNICOR	MUNICIPIO: MONTERÍA	Nº SERIE: 3324
VEREDA:	DPTO: CORDOBA	CÓDIGO: 2709165-1
		FECHA DE EMISIÓN: 26/10/2016

MUESTRA Identificación	pH	M.O %	S mg/kg	P mg/kg	Ca	Mg	K	Na	Al+H	CaCl ₂	Cu	Fe	Zn	Mn	B	FECHA EJECUCIÓN DE ENSAYO			
																04/10/16	04/10/16	05/10/16	06/10/16
	1:1																		
	6,63	2,53	23,3	12,8	13,8	8,8	0,39	0,48	---	23,5									
		C	C	D	A	A	A	B											

MUESTRA Identificación	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	(Ca+Mg)/K	Ca	Mg	K	Na	Relaciones de cationes				Porcentaje de saturación de cationes					
									Ca/K	Mg/K	(Ca+Mg)/K	Ca	Mg	K	Na	Ca	Mg	K
	1,6	35,4	22,6	57,9	58,7	37,4	1,7	2,0										

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

- A: Contenido Abundante o valor alto pero no excesivo.
- B: Contenido Suficiente o valor adecuado (Bueno)
- C: Contenido Moderado o valor medio (Regular)
- D: Contenido Deficiente o valor bajo (Pobre)
- E: Contenido Excesivo o valor muy alto, puede ser perjudicial
- F: Contenido Ínfimo o valor muy bajo (Muy pobre)

MÉTODOS DE ANÁLISIS
pH: relación suelo-agua 1:1; Potenciométrico (NTC 5264)
Materia orgánica (M.O): Walkley-Black (NTC 5403)
Azufre disponible (S): Monofosfato de calcio 0,008 M (IGAC 6ª Ed. 2006)
Fosforo disponible (P): Bray II (IGAC 6ª Ed. 2006)
Ca, Mg, K, Na: Acetato de amonio 1,0 M a pH 7,00 (IGAC 6ª Ed. 2006)

Acidez Intercambiable (AI+H): KCl 1,0 M NTC-5263
Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICe): Suma de cationes (IGAC 6ª Ed. 2006)
Elementos menores (Cu, Fe, Zn, Mn): Doble ácido (NTC-5526. Numerales 5.1, 3.3 y 5.4.3.)
Boro (B): HQ 0,05 M (NTC-5404. Numerales 4.1.2, 4.4.1.)


Universidad de Córdoba
Instituto de Estudios Agrícolas
ENRIQUE COMBATTI CABALLERO
Director Lab. de Suelos Y Aguas

OBSERVACIONES:

- Consulte a un Ingeniero Agrónomo o profesional del área de suelos.
- Los resultados contenidos en el presente informe sólo son representativos de las muestras analizadas
- El laboratorio conserva las muestras de los clientes por tres meses, cumplido ese tiempo son desechadas.
- * Este laboratorio hace parte de la red de laboratorios del programa CALS de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.

Una vez descargado o impreso este documento se considerará una copia no controlada, por favor asegurarse en el sitio <http://web3.unicordoba.edu.co/es/calidad/documentos> que está en la versión vigente.

ANEXO 6. Resultados laboratorio de toxicología ambiental

 NIT 891080031-3	UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA INFORME DE RESULTADOS LABORATORIO DE TOXICOLÓGIA Y GESTIÓN AMBIENTAL	CODIGO: FTX-002
		22-11-2011
		VERSIÓN: N° 01

Cons. N°: 16-018

DEPARTAMENTO: Córdoba	SOLICITADO POR: Ramiro Rueda
TIPO DE MUESTRAS: Plantas y suelos	
TOTAL MUESTRAS: 45	CÓDIGOS MUESTRA (S): TX-250516-01/45
RESPONSABLES DE MUESTREO: Cliente	RECEPCIÓN EN LABORATORIO: Saudith Burgos N.
FECHA DE MUESTREO: -	RESPONSABLE DE ANÁLISIS: Iván Urango
FECHA RECEPCIÓN MUESTRAS: 25/05/2016	
MÉTODO DE ANÁLISIS: EPA 7473	LDM: 0.1 µg/kg

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	MERCURIO TOTAL - T-Hg (µg/kg)
TX-250516-01	Planta - T0-1	41,80
TX-250516-02	Planta - T0-2	14,11
TX-250516-03	Planta - T1-1	44,93
TX-250516-04	Planta - T1-2	34,09
TX-250516-05	Planta - T1-3	42,34
TX-250516-06	Planta - T2-1	12,79
TX-250516-07	Planta - T2-2	50,97
TX-250516-08	Planta - T3-1	348,50
TX-250516-09	Planta - T3-2	58,22
TX-250516-10	Planta - T3-3	17,71
TX-250516-11	Planta - T0-2 - mes 2	44,53
TX-250516-12	Planta - T0-3 - mes 2	37,22
TX-250516-13	Planta - T1-1 - mes 2	144,97
TX-250516-14	Planta - T1-2 - mes 2	70,74
TX-250516-15	Planta - T1-3 - mes 2	80,71
TX-250516-16	Planta - T2-1 - mes 2	38,73
TX-250516-17	Planta - T2-2 - mes 2	45,58
TX-250516-18	Planta - T2-3 - mes 2	692,74
TX-250516-19	Planta - T3-1 - mes 2	47,58
TX-250516-20	Planta - T3-2 - mes 2	372,93
TX-250516-21	Planta - T3-3 - mes 2	77,15
TX-250516-22	Suelo - T0-1	85,20
TX-250516-23	Suelo - T0-2	77,87
TX-250516-24	Suelo - T1-1	1032,57
TX-250516-25	Suelo - T1-2	1102,23
TX-250516-26	Suelo - T1-3	1088,46
TX-250516-27	Suelo - T2-1	2713,92
TX-250516-28	Suelo - T2-2	2777,62
TX-250516-29	Suelo - T3-1	5849,27
TX-250516-30	Suelo - T3-2	5151,89



NIT 891080031-3

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
INFORME DE RESULTADOS
LABORATORIO DE TOXICOLOGÍA Y GESTIÓN
AMBIENTAL

CODIGO:
FTX-002

22-11-2011

VERSIÓN:
N° 01

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	MERCURIO TOTAL - T-Hg (µg/kg)
TX-250516-31	Suelo - T3-3	5962,04
TX-250516-32	Suelo - T0-2 - mes 2	105,98
TX-250516-33	Suelo - T0-3 - mes 2	112,09
TX-250516-34	Suelo - T1-1 - mes 2	1032,95
TX-250516-35	Suelo - T1-2 - mes 2	1135,46
TX-250516-36	Suelo - T1-3 - mes 2	955,69
TX-250516-37	Suelo - T2-1 - mes 2	2983,77
TX-250516-38	Suelo - T2-2 - mes 2	2937,63
TX-250516-39	Suelo - T2-3 - mes 2	2992,38
TX-250516-40	Suelo - T3-1 - mes 2	4462,41
TX-250516-41	Suelo - T3-2 - mes 2	5253,92
TX-250516-42	Suelo - T3-3 - mes 2	5255,46
TX-250516-43	Suelo - T1 INICIAL	1135,16
TX-250516-44	Suelo - T2 INICIAL	3206,12
TX-250516-45	Suelo - T3 INICIAL	6902,05

Nota importante: Los resultados presentados en este informe son válidos únicamente para las muestras analizadas, son de carácter confidencial y de propiedad del cliente. El laboratorio asegura la confidencialidad de los resultados presentados en este informe. El Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental no se hace responsable del método de obtención de la muestra ni sus condiciones antes de recibirlas, cuando estos procedimientos no estuvieron a cargo de del personal del laboratorio, por tanto, en estos casos no se harán interpretaciones con respecto a la representatividad y validez de las muestras.


JOSÉ LUIS MARRUGO NÉGRETE
 Director Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental