

**MACROPROCESO DE APOYO**

CODIGO: AAAr113

PROCESO GESTION APOYO ACADEMICO

VERSION:1

**DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA
DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL**

PAGINA: 1 de 7

Señores

UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA

BIBLIOTECA

Girardot - Cundinamarca

SEDE/SECCIONAL/EXTENSIÓN

Seccional Girardot

DOCUMENTO

Trabajo De Grado

FACULTAD

Ciencias Agropecuarias

**NIVEL ACADÉMICO DE FORMACIÓN O
PROCESO**

Pregrado

PROGRAMA ACADÉMICO

Ingeniería Ambiental

El Autor(Es):

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS	NO. DOCUMENTO DE IDENTIFICACIÓN
ARIAS MENESES	JHONATAN STEVEN	1.105.686.761
CORRECHA BRÍNEZ	JUAN PABLO	1.108.934.842

Director(Es) del documento:

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS
TAPIAS DUARTE	JUAN CARLOS

TÍTULO DEL DOCUMENTO

"DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL *Chrysopogon zizanioides*, PARA LA REMOCIÓN DE MERCURIO (Hg) Y CADMIO (Cd) DE LAS AGUAS, EN LA CUENCA BAJA, DEL RIO BOGOTÁ"

**MACROPROCESO DE APOYO**

CODIGO: AAAr113

PROCESO GESTION APOYO ACADEMICO

VERSION:1

**DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA
DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL**

PAGINA: 2 de 7

SUBTITULO

(Aplica solo para Tesis, Artículos Científicos, Disertaciones, Objetos Virtuales de Aprendizaje)

**TRABAJO PARA OPTAR AL TITULO DE:
Aplica para Tesis/Trabajo de Grado/Pasantía****AÑO DE EDICIÓN DEL DOCUMENTO**

21/10/2016

NÚMERO DE PÁGINAS (Opcional)

93

**DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLES: (Usar como mínimo 6
descriptores)**

ESPAÑOL	INGLES
1. Adaptación	Adjustment
2. Hidroponía	Hydroponic
3. Densidad	Density
4. Siembra	Sowing
5. Evaporímetros	Evaporímetros
6. Fitorremediación	Phytoremediation

**RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLES: (Máximo 250
palabras – 1530 caracteres):****RESUMEN :**

La CAR diferencia tres zonas que subdividen la cuenca del río Bogotá a lo largo de su trayectoria: cuenca Alta, Media y Bajo, según el Acuerdo 58 de 1987. La zona de mayor interés es la cuenca baja puesto que se evidencia un deterioro en la calidad del recurso hídrico con concentraciones altas de metales pesados que son bioacumulados por pastos y bovinos. Por esta razón se realizó una investigación para determinar la eficiencia del pasto vetiver (*Poaceae*: *Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) en la remoción de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) mediante fitorremediación; usando bandejas suspendidas con 12 agujeros a las densidades de siembra (tratamientos): 0%, 25%, 50%, 75% y 100% con tres repeticiones, que fueron analizadas en un diseño de bloque completo al azar. El proceso se dividió en tres fases: la primera consistió en determinar la evaporación en la finca el Silencio, ubicada en la vereda la Salada, del Municipio de Tocaima (Cundinamarca) sitio para el establecimiento de los tratamientos. Este proceso duro 21 días, tiempo en el cual se realizaron dos mediciones por semana de las variables: temperatura (°C), salinidad (µs/cm), pH y altura del agua (Cm), en evaporímetros artesanales de diferentes condiciones, de los cuales se implementó el proceso que presento menos evaporación. En la fase dos se usaron 13 canecas de 55 galones de color azul enterradas a la mitad, para montar los cuatro tratamientos con tres repeticiones, donde se realizaron tres mediciones de Hg y Cd, una por mes, mediante absorción atómica. En conjunto con la medición de pH, Conductividad y Temperatura (covariables). La tercera fase fue el análisis de los

**MACROPROCESO DE APOYO**

CODIGO: AAAr113

PROCESO GESTION APOYO ACADEMICO

VERSION:1

**DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA
DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL**

PAGINA: 3 de 7

resultados obtenidos, mediante el programa estadístico INFOSTAT (versión libre), del cual se determinó que la covariable conductividad es significativa para el proceso de fitorremediación del Cd.

ABSTRACT:

The CAR differentiates three zones that subdivide the basin of the river Bogota along his path: High, Average basin and Down, according to the Agreement 58 of 1987. The zone of major interest is the low basin since a deterioration is demonstrated in the quality of the water resource by high concentrations of heavy metals that are bioacumulados for pastures and bovine. For this reason an investigation was realized to determine the efficiency of the pasture vetiver (Poaceae: Chrysopogon zizanioides (L) .Roberty) in the removal of Mercury (Hg) and Cadmium (Cd) by means of fitorremediación; using trays suspended with 12 holes to the densities of sowing (treatments):0 %, 25 %, 50 %, 75 % and 100 % with three repetitions, which were analyzed in a design of complete block at random. The process divided in three phases: The first one consisted of determining the evaporation in the estate the Silence, located in the path the Salty one, of Tocaima's Municipality (Cundinamarca) I surround for the establishment of the treatments. This hard process 21 days, time in which two measurements were realized for week of the variables: temperature (°C), salinity (µs/cm), pH and height of the water (Cm), in evaporímetros handcrafted of different conditions, of which I implement the process that I present less evaporation. This hard process 21 days, time in which two measurements were realized for week of the variables: temperature (°C), salinity (µs/cm), pH and height of the water (Cm), in evaporímetros handcrafted of different conditions, of which I implement the process that I present less evaporation. In the phase two used 13 refuse bins of 55 gallons of blue color buried to the half, to mount four treatments with three repetitions, where there were realized three measurements Hg and Cd, one for month, by means of atomic absorption. As a whole with the measurement of pH, Conductivity and Temperature (covariables). The third phase was the analysis of the obtained results, by means of the statistical program INFOSTAT (free version), of which I determine the covariable conductivity is significant for the process of fitorremediación of the Cd.

AUTORIZACION DE PUBLICACION

Por medio del presente escrito autorizo (Autorizamos) a la Universidad de Cundinamarca para que, en desarrollo de la presente licencia de uso parcial, pueda ejercer sobre mí (nuestra) obra las atribuciones que se indican a continuación, teniendo en cuenta que, en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar, difundir y promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente licencia se autoriza a la Universidad de Cundinamarca, a los usuarios de la Biblioteca de la Universidad; así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los que la Universidad tenga perfeccionado un alianza, son:

Marque con una "x":

**MACROPROCESO DE APOYO**

CODIGO: AAAr113

PROCESO GESTION APOYO ACADEMICO

VERSION:1

DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

PAGINA: 4 de 7

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)		SI	NO
1. La conservación de los ejemplares necesarios en la Biblioteca.	X		
2. La consulta física o electrónica según corresponda.	X		
3. La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer.	X		
4. La comunicación pública por cualquier procedimiento o medio físico o electrónico, así como su puesta a disposición en Internet.	X		
5. La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previa alianza perfeccionada con la Universidad de Cundinamarca para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones.	X		
6. La inclusión en el Repositorio Institucional.	X		

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso mi (nuestra) obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los derechos patrimoniales y morales correspondientes, de acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

Para el caso de las Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, de manera complementaria, garantizo(garantizamos) en mi(nuestra) calidad de estudiante(s) y por ende autor(es) exclusivo(s), que la Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía en cuestión, es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi(nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro (aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos de la

	MACROPROCESO DE APOYO	CODIGO: AAAr113
	PROCESO GESTION APOYO ACADEMICO	VERSION:1
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	PAGINA: 5 de 7

Tesis o Trabajo de Grado es de mí (nuestra) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.

Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaré (continuaremos) conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "*Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores*", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Universidad de Cundinamarca está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

NOTA: (Para Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía):

Información Confidencial:

Esta Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de la investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se han publicado. **SI** **NO** **x** .

En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta tal situación con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

LICENCIA DE PUBLICACION

Como titular(es) del derecho de autor, confiero(erimos) a la Universidad de Cundinamarca una licencia no exclusiva, limitada y gratuita sobre la obra que se integrará en el Repositorio Institucional, que se ajusta a las siguientes características:

a) Estará vigente a partir de la fecha de inclusión en el repositorio, por un plazo de 5 años, que serán prorrogables indefinidamente por el tiempo que dure el derecho patrimonial del autor. El autor podrá dar por terminada la licencia solicitándolo a la Universidad por escrito. (Para el caso de los Recursos Educativos Digitales, la Licencia de Publicación será permanente).



MACROPROCESO DE APOYO	CODIGO: AAAr113
PROCESO GESTION APOYO ACADEMICO	VERSION:1
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	PAGINA: 6 de 7

- b) Autoriza a la Universidad de Cundinamarca a publicar la obra en formato y/o soporte digital, conociendo que, dado que se publica en Internet, por este hecho circula con un alcance mundial.
- c) Los titulares aceptan que la autorización se hace a título gratuito, por lo tanto, renuncian a recibir beneficio alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente licencia y de la licencia de uso con que se publica.
- d) El(Los) Autor(es), garantizo(amos) que el documento en cuestión, es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi (nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro(aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos es de mí (nuestro) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.
- e) En todo caso la Universidad de Cundinamarca se compromete a indicar siempre la autoría incluyendo el nombre del autor y la fecha de publicación.
- f) Los titulares autorizan a la Universidad para incluir la obra en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.
- g) Los titulares aceptan que la Universidad de Cundinamarca pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.
- h) Los titulares autorizan que la obra sea puesta a disposición del público en los términos autorizados en los literales anteriores bajo los límites definidos por la universidad en las "Condiciones de uso de estricto cumplimiento" de los recursos publicados en Repositorio Institucional, cuyo texto completo se puede consultar en biblioteca.unicundi.edu.co
- i) Para el caso de los Recursos Educativos Digitales producidos por la Oficina de Educación Virtual, sus contenidos de publicación se rigen bajo la Licencia



MACROPROCESO DE APOYO

CODIGO: AAAr113

PROCESO GESTION APOYO ACADEMICO

VERSION:1

DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

PAGINA: 7 de 7

Creative Commons : Atribución- No comercial- Compartir Igual.



j) Para el caso de los Artículos Científicos y Revistas, sus contenidos se rigen bajo la Licencia Creative Commons Atribución- No comercial- Sin derivar.



Nota:

Si el documento se basa en un trabajo que ha sido patrocinado o apoyado por una entidad, con excepción de Universidad de Cundinamarca, los autores garantizan que se ha cumplido con los derechos y obligaciones requeridos por el respectivo contrato o acuerdo.

La obra que se integrará en el Repositorio Institucional, está en el(los) siguiente(s) archivo(s).

Nombre completo del Archivo Incluida su Extensión (Ej. Título Trabajo de Grado o Documento.pdf)	Tipo de documento (ej. Texto, imagen, video, etc.)
1. Determinación de la eficiencia del Chrysopogon zizanioides, para la remoción de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) en la cuenca baja del rio Bogotá	Texto e imágenes
2.	
3.	
4.	

En constancia de lo anterior, Firmo (amos) el presente documento:

APELLIDOS Y NOMBRES COMPLETOS	FIRMA
ARIAS MENESES JHONATAN STEVEN	Jhonatan S. Arias Menezes
CORRECHA BRIÑEZ JUAN PABLO	

**DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL *CHRYSOPOGON ZIZANIOIDES*,
PARA LA REMOCIÓN DE MERCURIO (HG) Y CADMIO (CD) EN LA CUENCA
BAJA DEL RIO BOGOTÁ**

JHONATAN STEVEN ARIAS MENESES

CÓDIGO: 363212146

JUAN PABLO CORRECHA BRIÑEZ

CÓDIGO: 363212106

**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

GIRARDOT

2016

DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL *Chrysopogon zizanioides*, PARA LA REMOCIÓN DE MERCURIO (Hg) Y CADMIO (Cd) EN LA CUENCA BAJA DEL RIO BOGOTÁ

JHONATAN STEVEN ARIAS MENESES

CÓDIGO: 363212146

JUAN PABLO CORRECHA BRIÑEZ

CÓDIGO: 363212106

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Ambiental

Director Trabajo de Grado

Juan Carlos Tapias Duarte

Ingeniero Químico

UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

GIRARDOT

2016



Determinación de la eficiencia del *Chrysopogon zizanioides* (L. Roberty), para la remoción de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) en la cuenca baja del río Bogotá.

Programa de Ingeniería Ambiental
Seccional Girardot.

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Girardot – Cundinamarca 21 de Octubre del 2016

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo lo dedicamos en primera instancia a Dios, que nos ha permitido las capacidades intelectuales y físicas para llevar a buen término este arduo proyecto. A nuestros padres que mediante su apoyo, que va más allá de lo económico, pudimos escalar este primer peldaño de nuestra vida profesional, que consideramos muy importante para nuestro futuro.

También es dedicado este trabajo al mérito intelectual y espíritu investigativo de los docentes de la Universidad de Cundinamarca que apoyaron nuestro proyecto con sus muy valiosas opiniones y posturas, mediante las cuales nos formamos cada día en una posición más científica de la realidad.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto nos genera agradecimientos profundos a nuestros padres, pilares de nuestra educación y promotores de la motivación que hasta el día de hoy Dios nos ha permitido tener.

Le agradecemos al profesor **JUAN CARLOS TAPIAS**, por su entera colaboración intelectual y en gestión para que todo esto fuese posible.

Le agradecemos a la profesora **JUANITA ANDRADE LÓPEZ**, por apoyarnos en la interpretación estadística sacando parte de su tiempo valioso en este proceso investigativo.

También Agradecemos al Docente **JACK FRAN ARMENGOT GARCÍA PÉREZ**, cuyo espíritu investigativo, con un amor claro hacia la generación de nuevos investigadores, nos brindó la mano en muchas dificultades.

Y por último y no menos importante debemos agradecer al Docente **DANI DANIEL CUBILLOS**, quien nos apoyó desde un inicio con la idea, su entrega y colaboración fue completa. Muchas gracias a todos por poner un ladrillo para lo que mañana será una gran edificación de conocimientos para ayudar a la humanidad.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	21
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	23
2. JUSTIFICACIÓN	25
3. OBJETIVOS	27
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	27
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
4. MARCO REFERENCIAL.....	28
4.1. MARCO TEÓRICO	28
4.1.1. Contaminación ambiental.	28
4.1.2. Contaminación por metales pesados.	29
4.1.3. Características del pasto vetiver.	38
4.1.4. Fitorremediación con Vetiver.	39
4.1.5. Umbrales de tolerancia del pasto vetiver a Hg y Cd.	42
4.1.6. Posible acumulación de Mercurio (Hg) y Cadmio en el pasto vetiver.	43
4.1.7. Estudios bioacumulación en macrofitas.	47
5. MARCO CONCEPTUAL	48
6. MARCO GEOGRÁFICO.....	52
6.1. Ubicación geográfica del río Bogotá	52
6.2. Ubicación y características agroclimatológicas de la hacienda el Silencio	54
7. MARCO LEGAL.....	55
8. METODOLOGÍA.....	59
8.1. Universo, población y muestra.	59
8.2 Fase 1	59
8.2.1 Evaporímetros artesanales.	59
8.2.2 Adaptación hidropónica.	62
8.3 Fase 2	66
8.3.1 Establecimiento de los tratamientos.	66
8.4 Técnicas o instrumentos para la recolección de datos.	70
8.5 Análisis de Evaporímetros Artesanales.	71
8.6 Análisis Físico Químicos	71
8.7 Análisis estadístico	72

9	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	73
9.2	Análisis de la evaporación.	73
9.3	Eficiencia de la Adaptación Hidropónica.	74
9.4	Análisis de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) Inicial.....	74
9.5	Reducción en la concentración de mercurio y cadmio en los tratamientos.	75
9.6	Densidad de siembra.	81
9.6.1	Variación de la concentración de Cd en los cuatro tratamientos durante los tres meses.	81
9.6.2	Variación de la concentración de Hg en los cuatro tratamientos durante los tres meses.	82
9.7	Relación entre reducción en la concentración de los metales y las covariables.	84
9.7.1	Mediciones Conductividad	84
9.7.2	Mediciones de Temperatura	85
9.7.3	Mediciones de pH	86
10	Conclusiones	88
11	Recomendaciones	90
12	Anexos	92
13	Bibliografía.....	97

LISTADOS DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades químicas del Mercurio.	32
Tabla 2. Umbrales de tolerancia del pasto vetiver a Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd)	42
Tabla 3. Acumulación de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) en el pasto vetiver.....	43
Tabla 4. Temperaturas de desorción de algunas especies de Hg.	47
Tabla 5. Acumulación de los metales pesados en las plantas acuáticas.....	47
Tabla 6. Normatividad Colombiana	55
Tabla 7. Normatividad para la cuenca del río Bogotá.....	58
Tabla 8. Normas Técnicas.	58
Tabla 9. Tratamientos del experimento	69
Tabla 10. Mediciones de altura del agua en los evaporímetros durante (3) semanas.	73
Tabla 11. Características físico- químicas del canal de riego del día 4 de abril del 2016. .	75
Tabla 12. Registro de reducción de las concentración de Mercurio y Cadmio en los tratamiento.....	77
Tabla 13. Tasa de reducción de metales respecto al tiempo.....	80
Tabla 14. Test: LSD Fisher para Cd, respecto a la densidad.	81
Tabla 15. Test: LSD Fisher para Cd, respecto al mes.....	82
Tabla 17. Test: LSD Fisher para Hg, respecto a la densidad.	83
Tabla 18. Test: LSD Fisher para Hg, respecto al mes.....	83
Tabla 15. Mediciones de covariables.	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metilación aerobia del mercurio.	33
Figura 2. Ciclo del Mercurio en la biosfera.	34
Figura 3. Ciclo biogeoquímico del cadmio.	38
Figura 4. Absorción y transporte de agua, nutrientes y metales pesados por las células especializadas, llamadas pelos absorbentes.	44
Figura 5. Corte transversal de una raíz	45
Figura 6. Bioacumulación de los metales en la biomasa viva.	46
Figura 7. Bioadsorción de los metales en la biomasa viva.	46
Figura 8. Mapa del río Bogotá.	53
Figura 9. Las tres cuencas a lo largo de la trayectoria del río Bogotá.	53
Figura 10. Ubicación de la hacienda el Silencio	54
Figura 11. Establecimiento de evaporímetros artesanales.	60
Figura 12. Procedimiento para el establecimiento de los evaporímetros artesanales.	61
Figura 13. Multiparámetro EC500.	61
Figura 14. Macollas del Pasto Vetiver.	62
Figura 15. Procedimiento para el establecimiento de la adaptación hidropónica.	63
Figura 16. Desinfección de las macollas.	64
Figura 17. Corte de raíz y parte foliar del pasto vetiver	64
Figura 18. Botellas plásticas de 3L.	65
Figura 19. Exposición directa a la luz solar.	65
Figura 20. Procedimiento para el establecimiento de los tratamientos.	67
Figura 21. Infraestructura de protección contra la lluvia.	68
Figura 22. Sistema de flotamiento.	68
Figura 23. Motobomba de 1.5 Hp con rejilla.	69
Figura 24. Muestras de agua enviadas a CORPOICA.	70
Figura 25. Variación en la concentración de Cadmio a diferentes densidades de siembra durante el experimento.	76
Figura 26. Variación en la concentración de Mercurio a diferentes densidades de siembra durante el experimento.	76
Figura 27. Reducción en la concentración de Mercurio (mg/mes) en los tratamientos experimentales.	78
Figura 28. Reducción en la concentración de Cadmio (mg/mes) en los tratamientos experimentales	78
Figura 29. Registro de la conductividad durante los tres meses de la investigación.	85
Figura 30. Comportamiento de la temperatura en los tres meses de la investigación.	86
Figura 31. Comportamiento del pH durante los tres meses de la investigación.	87

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Análisis de laboratorio Inicial.....	92
Anexo 2. Análisis de laboratorio primer mes.	93
Anexo 3. Análisis de laboratorio segundo mes.....	94
Anexo 4. Análisis de laboratorio tercer mes.	95
Anexo 5. Registro de mediciones de covariables.....	96

RESUMEN

La CAR diferencia tres zonas que subdividen la cuenca del río Bogotá a lo largo de su trayectoria: cuenca Alta, Media y Bajo, según el Acuerdo 58 de 1987. La zona de mayor interés es la cuenca baja puesto que se evidencia un deterioro en la calidad del recurso hídrico con concentraciones altas de metales pesados que son bioacumulados por pastos y bovinos. Por esta razón se realizó una investigación para determinar la eficiencia del pasto vetiver (*Poaceae: Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) en la remoción de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) mediante fitorremediación; usando bandejas suspendidas con 12 agujeros a las densidades de siembra (tratamientos): 0%, 25%, 50%, 75% y 100% con tres repeticiones, que fueron analizadas en un diseño de bloque completo al azar. El proceso se dividió en tres fases: la primera consistió en determinar la evaporación en la finca el Silencio, ubicada en la vereda la Salada, del Municipio de Tocaima (Cundinamarca) sitio para el establecimiento de los tratamientos. Este proceso duro 21 días, tiempo en el cual se realizaron dos mediciones por semana de las variables: temperatura (°C), salinidad ($\mu\text{s/cm}$), pH y altura del agua (Cm), en evaporímetros artesanales de diferentes condiciones, de los cuales se implementó el proceso que presento menos evaporación. En la fase dos se usaron 13 canecas de 55 galones de color azul enterradas a la mitad, para montar los cuatro tratamientos con tres repeticiones, donde se realizaron tres mediciones de Hg y Cd, una por mes, mediante absorción atómica. En conjunto con la medición de pH, Conductividad y Temperatura (covariables). La tercera fase fue el análisis de los resultados obtenidos, mediante el programa estadístico INFOSTAT (versión libre), del cual se determinó que la covariable conductividad es significativa para el proceso de fitorremediación del Cd.

Palabras clave: Adaptación, Hidroponía, Densidad, Siembra, Evaporímetros, Fitorremediación.

ABSTRACT

The CAR differentiates three zones that subdivide the basin of the river Bogota along his path: High, Average basin and Down, according to the Agreement 58 of 1987. The zone of major interest is the low basin since a deterioration is demonstrated in the quality of the water resource by high concentrations of heavy metals that are bioacumulados for pastures and bovine. For this reason an investigation was realized to determine the efficiency of the pasture vetiver (Poaceae: *Chrysopogon zizanioides* (L) .Roberty) in the removal of Mercury (Hg) and Cadmium (Cd) by means of fitorremediación; using trays suspended with 12 holes to the densities of sowing (treatments): 0 %, 25 %, 50 %, 75 % and 100 % with three repetitions, which were analyzed in a design of complete block at random. The process divided in three phases: The first one consisted of determining the evaporation in the estate the Silence, located in the path the Salty one, of Tocaima's Municipality (Cundinamarca) I surround for the establishment of the treatments. This hard process 21 days, time in which two measurements were realized for week of the variables: temperature (°C), salinity ($\mu\text{s}/\text{cm}$), pH and height of the water (Cm), in evaporímetros handcrafted of different conditions, of which I implement the process that I present less evaporation. This hard process 21 days, time in which two measurements were realized for week of the variables: temperature (°C), salinity ($\mu\text{s}/\text{cm}$), pH and height of the water (Cm), in evaporímetros handcrafted of different conditions, of which I implement the process that I present less evaporation. In the phase two used 13 refuse bins of 55 gallons of blue color buried to the half, to mount four treatments with three repetitions, where there were realized three measurements Hg and Cd, one for month, by means of atomic absorption. As a whole with the measurement of pH, Conductivity and Temperature (covariables). The third phase was the analysis of the obtained results, by means of the statistical program INFOSTAT (free version), of which I determine the covariable conductivity is significant for the process of fitorremediación of the Cd.

Keywords: Adjustment, Hydroponic, Density, Sowing, Evaporímetros, Phytoremediation.

INTRODUCCIÓN

El río Bogotá, por su alto grado de contaminación ha sido llamado “*La mayor alcantarilla de Colombia*”¹, recibiendo diferentes tipos de vertimientos como lo dice la revista Dinero², vertimientos de curtiembres, residuos de productos fertilizantes, aguas negras de las poblaciones cercanas y residuos industriales de minería ilegal, pero más preocupante aún, las cargas vertidas por los ciudadanos de la capital que representan un 80% de la contaminación. Estos vertimientos traen consigo el Mercurio (Hg) y el Cadmio (Cd).

Investigaciones anteriores demuestran que a medida que van pasado los años la carga contaminante del río Bogotá se ha aumentado más de lo que ha establecido la normatividad colombiana y la bioacumulación de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) en bovinos, pastos y en los seres humanos, se indica que nueve de cada 10 bogotanos tienen Mercurio en su organismo³.

Calderón y otros, determinan la concentración de Mercurio y Cadmio, junto con la de otros metales pesados, que es bioacumulada por pastos regados con el agua de río Bogotá, y bovinos que beben directamente del río Bogotá⁴. Los resultados muestran concentraciones de Cadmio en el agua, elevadas hasta 1.3 veces más que lo establecido por el Ministerio de Salud en ese momento mediante la resolución 4547 de 1998. En cuanto al Mercurio, los bovinos presentaron en el análisis de su riñón, una concentración promedio bioacumulada 1.7 veces mayor a lo establecido por los límites de tolerancia ($\mu\text{g} / \text{kg}$) de tejido renal.

Debido a esta problemática dada por la bioacumulación de estos metales, se inició este trabajo de investigación que muestra la eficiencia del pasto vetiver (*Poaceae*:

¹Preciado, a. p. el problema del río bogotá. En: Fundación al Verde Vivo.2012.

²Dinero. Río Bogotá le pasa factura al gobierno. 2014.

³Agencia de Noticias de la Universidad Nacional. El Espectador, pág. 1.2012.

⁴Rubiano Calderón, J. A., Montealegre Ramos, O., & García Barros, E. J. Contaminación del agua, los pastos, la leche y las carnes bovinas por arsenico, mercurio, plomo y cadmio en la planicie aluvial baja del río Bogotá.1997.

Chrysopogon zizanioides (L) Roberty) para el tratamiento de descontaminación por Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) en aguas de la cuenca baja del río Bogotá, en un tramo de este río, desviado para uso de riego en la agricultura, ubicado en el kilómetro 25 vía Girardot – Tocaima, utilizando el método de fitorremediación sobre el agua del río Bogotá, disminuyendo la contaminación y sus efectos nocivos.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Hoy en día existe una problemática que ha generado daños en la salud humana, animal y vegetal, causando un desequilibrio ecológico. Por actividades mineras e industriales que vierten grandes cantidades de contaminantes a ríos y cuerpos hídricos en general, el agua empieza a ser nociva para casi cualquier ser viviente con excepción de unos pocos que han desarrollado resistencia ante estos gradientes. La escasez del agua por la contaminación de su fuente, además de reducir la disponibilidad del recurso para las generaciones futuras, limita el desarrollo económico, cultural y social de los estados, las regiones y el país en general. También esta contaminación excesiva de los recursos hídricos afecta la integridad de los ecosistemas, poniendo en riesgo la riqueza de la biodiversidad Colombiana.

Hay una gran cantidad de contaminantes que están siendo vertidos a los ríos y quebradas afectando la calidad de las aguas y al ecosistema en general; como es el caso del Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd), metales altamente tóxicos, que presentan la capacidad de bioacumularse en organismos que circulan en la cadena trófica y posteriormente; según la concentración de metales que posea la biomasa de los organismos, se pueden generar mutaciones, enfermedades crónicas, alergias y en los casos más avanzados un cáncer. El río Bogotá es uno de los más contaminados de Colombia, el cual posee los metales antes mencionados⁵.

Según Gónima “El pez Capitán, único bagre de las altas regiones colombianas, podría llegar a desaparecer de la cuenca Alta del Río Bogotá por los altos niveles de metales pesados que hay en sus aguas”⁶, con el paso de los años la peligrosidad para otras especies avanzara mucho más, como lo afirma en 1983 la

⁵ CAR. Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Bogotá. Pag.2,3,4,5.2006

⁶ Gónima, N. El Espectador.2015.

OMS: “al año, dos millones de personas se intoxican por exposición directa o indirecta a estos tóxicos y tres cuartas partes son personas en países subdesarrollados donde se utiliza el 25% de la producción mundial de plaguicidas. Una de las actividades en donde más se usan este tipo de químicos en Colombia es en la floricultura que abarca el 28% de actividad socioeconómica alrededor de la cuenca del Río Bogotá”⁷.

⁷OMS. 1983

2. JUSTIFICACIÓN

El río Bogotá tiene reportes de contaminación por metales pesados de hace varias décadas, como lo demuestra Mejía y Panizzo⁸, en los análisis de composición del río Bogotá en diferentes puntos de la cuenca, en 1982 donde se encontró mercurio en concentraciones mayores a 0,067 mg.L⁻¹ y de igual manera Cadmio con concentraciones mayores a 0,01 mg.L⁻¹, datos que sobrepasan los límites permisibles, incluso actualmente, como lo estipula la Resolución 1207 del 2014. La CAR⁹, en el año 2009 publico que el río Bogotá recibe por vertimientos de industrias una descarga total de 51,62 Toneladas por mes de metales pesados, lo cual lo deja en un estado crítico de toxicidad. La Agencia Estadounidense para el Registro de Sustancias Tóxicas y Enfermedades, afirma que “cuatro de los metales más tóxicos son: Arsénico, Cadmio, Plomo y Mercurio”¹⁰.

Debido a los antecedentes que presenta el Río Bogotá, específicamente en la cuenca baja, por altas concentraciones de metales pesados, se pretendía identificar la eficiencia del pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L). Roberty) para la remoción de Hg y Cd, con una muestra de agua tomada de un tramo de la cuenca baja del río Bogotá. Esta investigación se centró en obtener información de cuanto lograría retener el pasto vetiver en remover estos metales del agua, para lo cual, por motivos de presupuesto se realizaron análisis físico – químicos sobre la muestra de agua, monitoreando las variaciones en las concentraciones de Hg y Cd durante todo el proceso, en conjunto con los cambios sufridos en unas posibles covariables del proceso y, de este manera determinar una tasa probable de disminución de los metales mencionados que puede ser atribuida al vetiver, pasto que ha sido muy útil en la descontaminación de suelos y amarra de este; pero de

⁸ Galeano, S. G. Contaminación por Cadmio y Arsenico en suelos y hortalizas en un sector de la cuenta del río Bogotá. 1994.

⁹ Corporación Autónoma Regional (CAR). Evaluación ambiental y plan de gestión ambiental. 2009

¹⁰ Agencia Estadounidense para el Registro de Sustancias Tóxicas. Módulo IV - Estudio de sustancias tóxicas. 2009.

la cual existe poca información e investigación en descontaminación de cuerpos hídricos. Este pasto puede convertirse en una herramienta de bajo presupuesto siendo útil en la salud de la población y el ambiente.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL.

Determinar la eficiencia que presenta el pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty), para retener Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) a partir de cuatro diferentes densidades de siembra, en una muestra de agua tomada de un tramo de la cuenca baja del río Bogotá.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar la tasa de disminución de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd), en una muestra de agua tomada de un tramo de la cuenca baja del río Bogotá, sometida a cuatro densidades de siembra con pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty).
2. Identificar cual es la densidad de siembra optima, que permite establecer altos porcentajes de retención y largos periodos de vida útil del material vegetal.
3. Conocer la relación entre el pasto Vetiver y las variables que serán monitoreadas (Conductividad, Temperatura, pH y Salinidad), para evaluar el proceso de fitorremediación.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. MARCO TEÓRICO

4.1.1. Contaminación ambiental.

Para contextualizar un poco en el tema a tratar, es de suma importancia tener presentes y claros algunos conceptos básicos, como qué es en si la contaminación ambiental y específicamente entender como es esta cuando es causada por metales pesados y que tipo de implicaciones tiene en el ambiente.

Inicialmente es importante tener claro que “La contaminación es un cambio perjudicial en las características físicas, químicas o biológicas del aire, la tierra o el agua, que puede afectar nocivamente la vida humana o la de especies beneficiosas, los procesos industriales, las condiciones de vida del ser humano y puede malgastar y deteriorar los recursos naturales renovables”¹¹.

Algunas veces la contaminación puede darse por causas naturales, pero por lo general está relacionada con la actividad humana¹². Para el caso de este documento se contextualizan estas actividades humanas especialmente al sector industrial, del cual el decreto 3930 de 2010, en su artículo 16 titulado “usos industriales del agua”, incluye la minería como actividad industrial. También se tienen presentes las demás actividades que generen vertimientos con metales pesados.

¹¹ Atilio de la orden, Eduardo. Contaminación. Tomado de: Universidad Nacional de Catamarca, Área Ecológica ISSN: 1852-3013, Catamarca, S.f.

¹² Bautista Zúñiga, Francisco. Introducción al Estudio de la Contaminación del Suelo por Metales Pesados. Universidad Autónoma de Yucatán, ISBN: 968-7556-81-1. Yucatán, México. 1999.

4.1.2. Contaminación por metales pesados.

A causa de los daños severos que ocasionan por estos, los metales pesados se han vuelto un tema de mucha importancia actualmente, tanto en el tema ambiental como en salud pública. Los daños ocasionados por los metales pesados son tan severos que las autoridades ambientales y de salud han prestado más importancia y cuidado a la minimización en la exposición a estos elementos de gran toxicidad¹³.

La contaminación por metales pesados en suelos ocasiona que estos tiendan a ser accesibles para ser consumidos por las plantas mediante sus raíces¹⁴. Esta contaminación es atribuida generalmente a la minería, pero la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales¹⁵ define algunas actividades como las principales generadoras de cada metal pesado. Para el presente documento se tomó la información de las actividades industriales en derramar Mercurio y Cadmio:

Mercurio

- Actividades mineras de extracción de oro, plata y cobre.
- Fundición primaria y secundaria de metales.
- Producción de carbón y coque.
- Combustión de combustóleo y carbón en la generación de electricidad.
- Industria de cloro-sosa.
- Incineración de residuos peligrosos y biológicos infecciosos.

¹³Valdés Perezgasga, Francisco. Contaminación por metales pesados en Tereon, Coahuila, México. México. 1999.

¹⁴Citado por Puga, Soraya; Sosa, Manuel; Lebgue, Toutcha; Quintana, Cesar & Campos, Alfredo. En: Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera. Ecología Aplicada, ISSN 1726-2216. Lima. 2006.

¹⁵Secretaria de Media Ambiente y Recursos Naturales. Metales Pesados. México. 2009 (Naturales, 2009)

Cadmio

- Baterías Recargables de Níquel/Cadmio (Ni/Cd):
 - Fertilizantes.
 - Pigmentos y Estabilizadores en Plástico y PVC.
 - Pigmentos en Pinturas.
 - Galvanización.
 - Catalizadores y Conservadores en la Industria del Plástico.
 - Elaboración de Pinturas.
 - Aleaciones.

Mediante los vertimientos de cualquier actividad de estas puede ingresar el Mercurio o el Cadmio a procesos vitales para el hombre y/o el medio ambiente, bien sea mediante el ingreso de estos vertimientos a cultivos¹⁶, fuentes de abastecimiento para plantas de tratamiento de agua potable¹⁷ e incluso ecosistemas terrestres y marinos¹⁸.

4.1.2.1. El Mercurio (Hg).

Este metal se ha utilizado desde la antigüedad por sus varias aplicaciones. En los antiguos imperios egipcios y chinos donde se encontró la utilidad como pintura para la piel del cinabrio (HgS)¹⁹. Este metal ya se hacía presente en el uso para la minería desde el año 700 a.C, donde los fenicios lo utilizaban para la recuperación de oro.

¹⁶Citado por Puga, Soraya; Sosa, Manuel; Lebgue, Toutcha; Quintana, Cesar & Campos, Alfredo. En: Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera. Ecología Aplicada, ISSN 1726-2216. Lima. 2006.

¹⁷Méndez Prieto, Judith; Gonzales Ramírez, Cesar A.; Gutiérrez Román, Alma D. & Prieto García, Francisco. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. Tropical and subtropical agroecosystems. Universidad Autónoma del estado de Hidalgo. México. 2009.

¹⁸Ablanado, Nora; Gonzales, Humberto; Ramírez, Marta & Ibis, Torres. Evaluación del erizo de mar *Echinometra lucunter* como indicador de contaminación por metales pesados, Cuba. La Habana, Cuba. 1990.

¹⁹AKSOY, A. Y ÖZTÜRK, M.A. Nerium oleander L. as a biomonitor of lead and other metal pollution in Mediterranean environments. The science of the total environments 205: 145 – 150. 1997.

Además de esto, Lominchar, M.A.; Sierra, M.J.; Rodríguez, J. & Millán, R. afirman que “el mercurio fue utilizado con fines médicos, tanto en la época griega y romana como posteriormente en el siglo XV, donde se comenzó a emplear para el tratamiento de la sífilis continuándose su aplicación incluso hasta principios del siglo XX, aunque en esa misma época ya existían estudios donde se mencionaban los efectos perjudiciales del mercurio en la salud humana”²⁰.

El Mercurio en general ha tenido muchas otras aplicaciones en la elaboración de diferentes objetos de uso cotidiano como: “tacómetros, termostatos, enchufes, luminarias, electrodos de referencia de medición de potenciales, pigmentos, o pesticidas, como amalgamas de plata para empastes de dientes. Todo ello gracias a la tendencia del mercurio a formar aleaciones con muchos otros metales, tener carácter líquido a temperatura ambiente y una conductividad del calor pobre pero buena conductividad eléctrica”²¹.

Químicamente el Mercurio es conocido con el símbolo Hg y se encuentra en el grupo IIB de la tabla periódica. A continuación se presenta en la tabla 1. Propiedades químicas expuesta por Adriano:

²⁰Lominchar, M.A.; Sierra, M.J.; Rodríguez, J. & Millan, R. Estudio del comportamiento y distribución del Mercurio presente en muestras de suelo recogidas en la ribera del río valdeazoguez. Madrid. 2010.

²¹Adriano, D.C. Mercury. Trace elements in the territorial environments. 2nd Edition. Springer. New York, EEUU. Citado en: Lominchar, M.A, *et al.* Estudio del comportamiento y distribución del Mercurio presente en muestras de suelo recogidas en la ribera del río valdeazoguez. Madrid. 2010.

Tabla 1. Propiedades químicas del Mercurio.

PROPIEDADES DEL MERCURIO			
Nº Atómico	80	Formas en la naturaleza	Estado nativo
Peso Atómico	200,59		Complejos inorgánicos
Punto de fusión	-38,9°C		Complejos orgánicos
Punto de ebullición	356,6°C		Sulfuros mercúricos y Sulfosales mercúricas estables
Densidad	13,55 g/cm ³ a 25°C	Minerales principales	Cinabrio
Solubilidad	6*10 ⁻⁵ g/l a 25°C		Livigstonia
Presión de vapor	1,22*10 ⁻⁵ mm a 20°C 2,8*10 ⁻⁵ mm a 30°C		Metacinabrio
Estado de oxidación	0, I y II		

Fuente: Adriano, D.C.; 2010

4.1.2.2. El Metilmercurio, toxicidad y la cadena Alimenticia.

El metilmercurio (CH₃Hg) es una de las formas orgánicas del mercurio de mayor toxicidad, en conjunto con el dimetilmercurio (CH₃HgCH₃). Este compuesto metálico nace inicialmente por una biotransformación que tiene lugar en los ríos y cuerpos de agua y, los microorganismos son los autores. Estos microorganismos transforman el Hg en metilmercurio y de esta manera lo incorporan en la cadena trófica²².

Según Figueroa: “El proceso de la metilación del Hg puede llevarse a cabo por dos vías: aeróbica y anaeróbica, como se muestra en la figura 1. La metilación anaerobia se lleva a cabo por compuestos derivados de la metilcobalamina que son producidos por bacterias metanogénicas en un ambiente moderadamente reductor”²³. Mientras que “en la vía aeróbica, el mercurio que está unido a la homocisteína se metila por los procesos celulares que normalmente dan lugar a la formación de la metionina. En este caso el complejo homocisteína-Hg se metila “por error”. Esto ocurre en muchos microorganismos y bacterias”²⁴.

²²Doadrio Villarejo, Antonio L. Ecotoxicología y acción toxicológica del Mercurio. Real academia de nacional de farmacia. s.f.

²³Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. Curso básico de toxicología ambiental. Metepec, Eco. 1985. P183 – 204. Citado en Figueroa Navarrete, Adela. Mercurio y Metilmercurio. s.f.

²⁴Ibid., p. 11

El metilmercurio es un compuesto muy tóxico que gracias a los grupos tioles presentes en los residuos de la cisteína presente en las proteínas, es capaz de actuar en los tejidos²⁵. León & Peñuela aseguran que aunque el pescado es la principal fuente de ingreso del metilmercurio en la alimentación humana, existen múltiples registros de este compuesto sumamente tóxico en otros elementos alimenticios como la carne de animales y el arroz producido en China²⁶.

Debido a la presencia de este compuesto en especies como el pescado, se hace inminente la biomagnificación del metilmercurio en algunas poblaciones, que culturalmente consumen estas especies como parte de su dieta ordinaria o por simplemente ser el único recurso disponible.

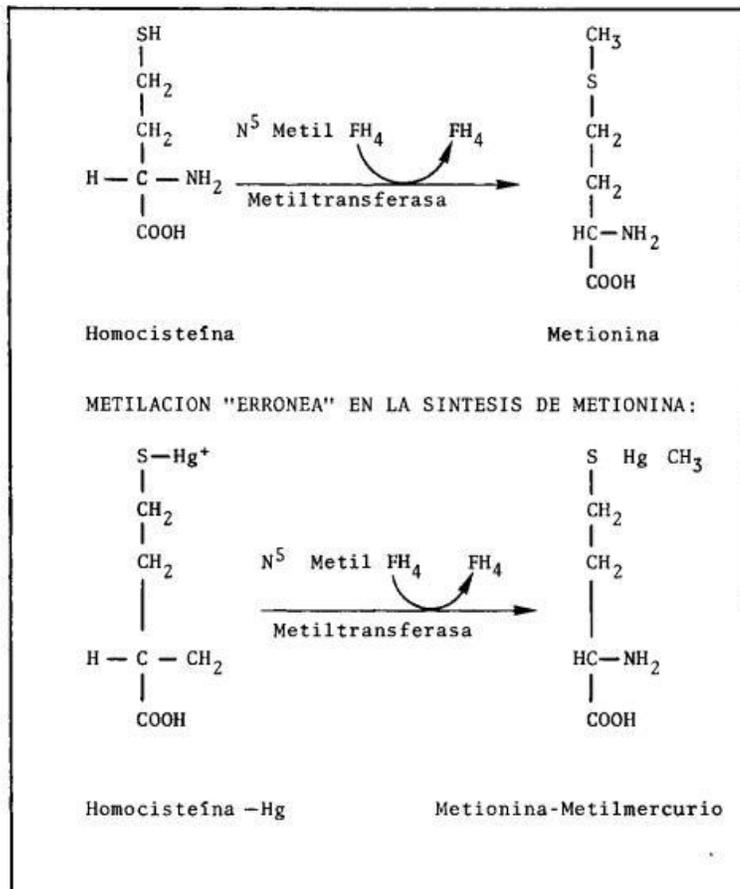


Figura 1. Metilación aerobia del mercurio. ; Fuente: Figueroa Navarrete, Adela; 1985

²⁵ León Pérez, Daniel Esteban & Peñuela Mesa, Gustavo Antonio. Universidad de Antioquia. 2011.

²⁶ *Ibid.*

4.1.2.3. Ciclo biogeoquímico del Mercurio (Hg).

Lominchar *et al.* Describen el inicio de este ciclo con la liberación de este metal mediante la erosión de rocas que contienen minerales de mercurio, luego este al agua: superficial y subterránea, donde finalmente llegara al mar, allí sufre procesos de desgasificación y volatilización, pasando así a la atmosfera.²⁷ En este punto del ciclo los autores hacen énfasis en que la fase atmosférica del Hg es dominante, puesto que la naturaleza en sus procesos gaseosos libera casi 1/3 de la concentración total de Hg²⁸.

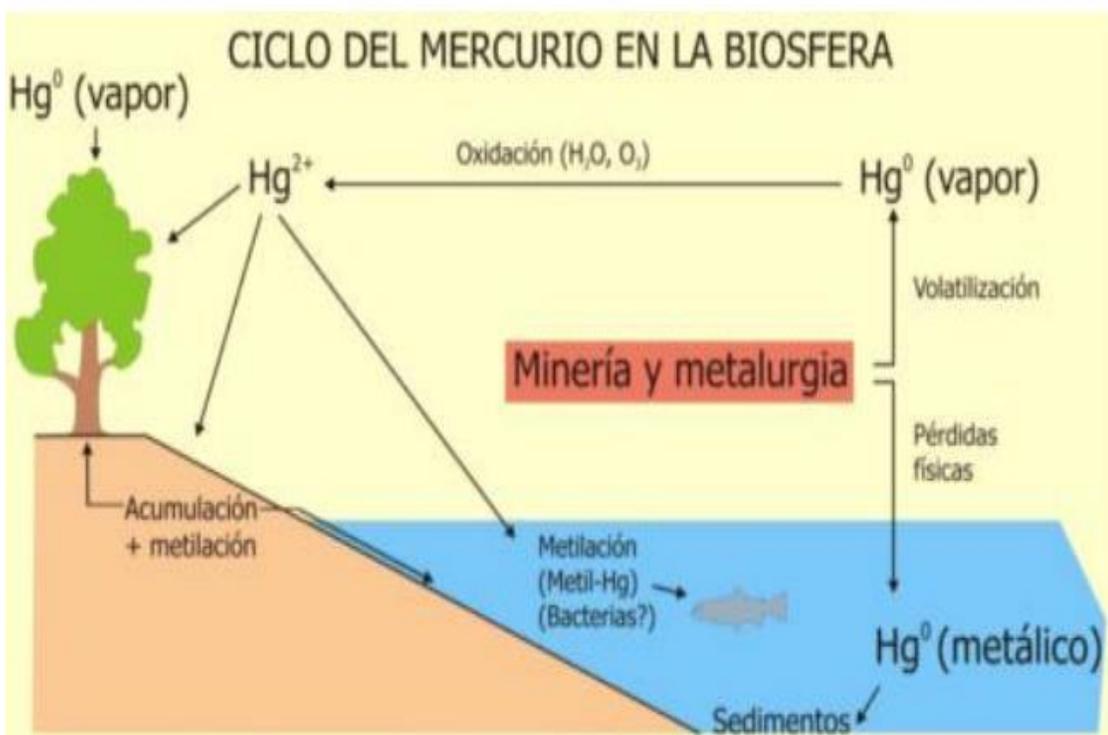


Figura 2. Ciclo del Mercurio en la biosfera. ; Fuente: Estudio del Comportamiento y Distribución del Mercurio Presente en Muestras de Suelo Recogidas en la Ribera del Río Valdeazogues, 2010.

²⁷Lominchar, M.A.; Sierra, M.J.; Rodríguez, J. & Millan, R. Estudio del comportamiento y distribución del Mercurio presente en muestras de suelo recogidas en la ribera del río valdeazogues. Madrid. 2010

²⁸Martínez Gaona, X. El mercurio como contaminante global. Universidad Autónoma de Barcelona. 2004.

4.1.2.4. El Cadmio (Cd).

El Cadmio es un metal pesado de símbolo Cd y se encuentra ubicado en el grupo de transición IIB en la tabla periódica, junto con el Hg y su estado natural es sólido, de color gris metálico. El número atómico del Cd es 48 y su punto de fusión se da a los 549,22 grados Kelvin o a 322,07 grados Celsius o centígrados²⁹.

Este metal se encuentra clasificado entre los más peligrosos para la vida acuática, en conjunto con el Zn, Pb y el Cu, debido a que son muy tóxicos aun en concentraciones muy bajas, por ser metales pesados (sin función biológica significativa) tienden a bioacumularse y biomagnificarse a lo largo de la cadena trófica³⁰.

En la naturaleza se puede encontrar asociado a muchos minerales, pero en el agua este metal se encuentra como ion libre y, rápidamente se une al material particulado. Pero cuando llegan al mar, por lo general el ion Cd^{+2} al igual que los iones de otros metales pesados, tiende a sedimentarse en la costa, afectando el directamente a los estuarios³¹.

Ramírez Augusto³² indica que los principales usos y aplicaciones antrópicas del cadmio o sus compuestos son:

- Como pigmento en pinturas, esmaltes, plásticos, textiles, vidrios, tintas de impresión, caucho, lacas, etc.
- En aleación con cobre, aluminio y plata.

²⁹Pino, Fernando. Características del cadmio. s.f.

³⁰Lima Cazorla, Lázaro; Olivares-Rieutmon, Susana; Columbie, Isaida; de la Rosa Mederos, Daniel; Gil Castillo, Reynaldo. Niveles de plomo, zinc, cadmio y cobre en el río Almendares ciudad Habana, Cuba. Cuba. 2005.

³¹Badillo German, Francisco. Toxicología ambiental. 1985.

³²Ramírez, Augusto. Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. Anales de la facultad de medicina, ISSN 1025 – 5583. 2002.

- En la producción de pilas de cadmio-níquel.
- Como estabilizador de termoplásticos, como el PVC.
- En fotografía, litografía y procesos de grabado.
- Como “endurecedor” de ruedas y llantas de automóvil.
- En fabricación de foto - conductores y células solares fotoeléctricas.
- El electroplatinado.
- En fabricación de “controles” de reactores nucleares.

4.1.2.5. Toxicidad del Cadmio (Cd).

El cadmio es un metal que sin saberlo, el hombre empezó a liberar desde los inicios del proceso de fundición y refinación de metales como el zinc, plomo y cobre³³. Ramírez³⁴ declara que el cadmio actualmente es considerado uno de los mayores agentes tóxicos por contar con todas las características de peligrosidad más temidas en un toxico:

- 1) Efectos adversos para el hombre y el medioambiente.
- 2) Bioacumulación.
- 3) Persistencia en el medio ambiente.
- 4) “Viaja” grandes distancias con el viento y en los cursos de agua.

Este metal tiene como principal vía de ingreso en el hombre mediante la alimentación, partiendo del ingreso en los vegetales y productos animales. Ramírez también indica que el cadmio “se fija a las plantas más rápidamente que el plomo” pero que su mayor concentración se encuentra en las hojas, por encima de las semillas y frutos³⁵.

³³Badillo German, Francisco. Toxicología ambiental. 1985.

³⁴Ramírez, Augusto. Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. Anales de la facultad de medicina, ISSN 1025 – 5583. 2002.

³⁵Ibíd., p. 3

Después de su ingreso en las células, el cadmio se une a la metalotioneína que contiene 26 grupos SH, gracias a los residuos de cisteína³⁶. Esta molécula de proteína según la teoría tiene como función la protección del sistema enzimático celular, aunque también se le ha atribuido la función de unirse específicamente a los metales pesados como el cadmio. En este punto, Ramírez³⁷ advierte que según estudios es más perjudicial el complejo Cd-Metalotioneína que el cadmio en sí, para el caso de los túbulos renales.

Como tal el mecanismo de su toxicidad en las plantas no es claro aun, pero si se ha determinado que el Cd interfiere en el ingreso, transporte y disponibilidad de algunos nutrientes esenciales como el K, Ca, Mg y P y también del agua, generando desequilibrios en la nutrición e hídricos en las plantas³⁸.

4.1.2.6. Ciclo biogeoquímico del Cadmio (Cd).

El ciclo natural de los metales esta alterado por la acción del hombre, por lo cual no se puede describir el comportamiento del cadmio sin las intervenciones humanas. Inicialmente este metal ingresa al suelo por erosión de la roca madre y la adición por fertilizante. Luego por ingresa a los cuerpos hídricos superficiales y por filtración a los mantos freaticos, donde finalmente van al mar. De alli es inevitable que el cadmio se evapore, e ingrese a la atmosfera, debido a que es un metal relativamente volatil. Pero este no es el unico medio actual de ingreso: antropicamente las emisiones de gases en actividades industriales previamente descritas, son fuente de cadmio para la atmosfera, principalmente en el proceso de

³⁶Ibíd., p. 5

³⁷Ibíd., p. 5

³⁸Poschenrieder C.; Gunsé, B. & Barceló, J. Influence of cadmium on water relations, stomatal resistance, and abscisic acid content in expanding bean leaves. *Plant Physiology* 90:1365-1371. 1989. Citado en: Serrano Rodríguez, M.; Martínez de la casa, N.; Romero Puertas, M.C.; del Rio, L.A. & Sandalio, L.M. Toxicidad del cadmio en plantas. *Revista: Ecosistemas*, ISSN 1697-2473. 2008.

soldadura. Después ya en la fase atmosférica, mediante la precipitación el cadmio vuelve al suelo³⁹.

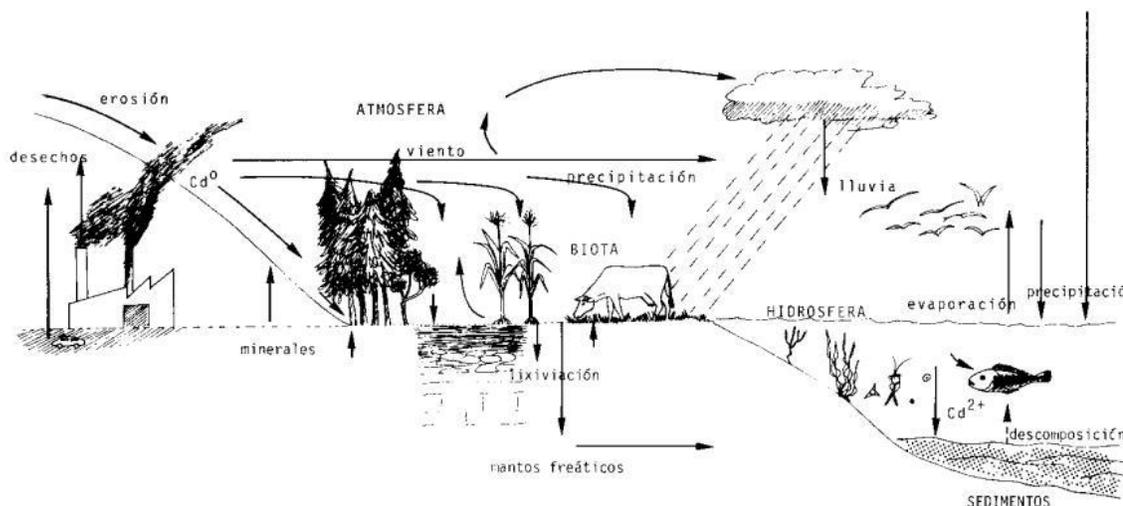


Figura 3. Ciclo biogeoquímico del cadmio. ; Fuente: Toxicología ambiental, capítulo doce: Cadmio; 1985

4.1.3. Características del pasto vetiver.

El pasto vetiver es una planta tropical, originaria del norte de la India y del sur de China⁴⁰, que pertenece a la familia gramíneas (Poaceae), subfamilia Panicoideae. El vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) es una planta perenne que posee un sistema radicular masivo, profundo (2 a 3 m de crecimiento en un año); fuerte, su resistencia a la tracción es de 75 MPa, equivalente a 1/6 del acero blando, ello amarra el suelo⁴¹. La red de sus raíces aumenta la resistencia del suelo a la erosión porque las raíces aumentan la resistencia al corte del suelo por 30 - 40%. Su follaje es erecto, alto, abundante e igualmente fuerte; siendo capaz, cuando se establecen barreras con él, de soportar láminas de agua de inundación de hasta 80 cm y reducir su velocidad casi a cero; a la vez que retiene los sedimentos. Es una planta asexual, es decir, sus semillas no son fértiles, y por ende no hay riesgo de que se convierta en maleza. Una vez establecido tolera

³⁹ Badillo German, Francisco. Toxicología ambiental. 1985.

⁴⁰ Chaipattana Network Webmaste. 1996.

⁴¹ Mirabal, R. L. Vetiver system for environmental protection of open cut . *CVG Bauxilum*. 2004.

condiciones extremas de: sequías; inundaciones; quema (rebrot a la semana); temperaturas (-14° C a 46° C); altitudes (0 m hasta 2800 msnm); pH (3 a 12.5); se adapta a suelos y aguas con presencia de aluminio, arsénico, cadmio, cobre, cromo, plomo, manganeso, mercurio, níquel, selenio y zinc; suelos sódicos, salinos, alcalinos⁴².

4.1.3.1. Características morfológicas y fisiológicas.

Se ha demostrado que por sus características morfológicas y fisiológicas que el vetiver es eficiente para la eliminación de Zinc, Plomo, Mercurio, Cadmio y Cromo, aunque a altas concentraciones la presencia de los mismos inhibe la producción de materia seca y la tasa fotosintética⁴³, su aplicación es de bajo costo, ecológico y una herramienta de bioremediación.

4.1.4. Fitoremediación con Vetiver.

En el año 2013, Arce, Sandra; Azuaje, Juana; Hernández, Ángela, Marcó, Lué y Sajo-Bohus, Laszlo ⁴⁴; estudiantes del Liceo Bolivariano “Simón Bolívar”, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado y la Universidad Simón Bolívar, realizaron un estudio llamado: “Uso de *Chrysopogon zizanioides* para la Fitoremediación de suelos contaminados por As y Hg”, llevado a cabo en el vertedero ilegal de lomas de Tabure II y III, ubicado en el municipio Palavecino del estado Lara-Venezuela. Este estudio fue básicamente realizado mediante los datos obtenidos en el crecimiento de dos diferentes tratamientos: Uno control (sin contaminar), y uno experimental (muestra contaminada del sitio mencionado). Los resultados obtenidos fueron simplemente que los dos tratamientos crecieron y

⁴²_____

Truong, D. Uso de vetiver para la fitorremediación de cromo en lodos residuales de una curtiembre .

⁴³Truong, P., & Baker, D. Pasto vetiver para la estabilización y la rehabilitación de los suelos sulfatados ácidos. Coffs Harbour, 196-8. .1996.

⁴⁴Arce Sandra, A. J. Universidad Simón Bolívar. En uso de *Chrysopogon zizanioides* para la fitorremediación de suelos contaminados por As y Hg.2013.

resistieron, en el caso de muestra experimental, los altos niveles de contaminación que ésta poseía. Concluyendo ellos, que la presencia de estos metales altamente contaminantes no afectó las características físicas del vetiver como: rigidez, coloración y marchitez.

También en Venezuela, una mujer llamada Carmen Infante, representó en un estudio al Intevet, el cual es el instituto de tecnología de la compañía venezolana de petróleo (PDVSA), en conjunto con 3 alemanes: Regine Brandt, de la Universidad de Münster, Instituto de Ecología del Paisaje; Rainer Schultze-Kraft⁴⁵, de la Universidad de Hohenheim, Instituto de Producción Vegetal y Agroecología en los trópicos y subtrópicos; y Gabriele Broll, de la Universidad de Vechta, Departamento de Geo y Ecología Agrícola. El estudio llamado: “Potencial de Vetiver (*Vetiveria zizanioides* L. Nash) para la Fitoremediación de suelos contaminados de hidrocarburos de petróleo en Venezuela”, fue llevado a cabo analizando el comportamiento y crecimiento del Vetiver en un suelo altamente contaminado por hidrocarburos y el mismo proceso en un suelo sin contaminar. En primera instancia, el crudo pesado empezó causándole daños al vetiver, pero la planta desarrolló rápidamente la capacidad de reproducirse vegetativamente. En un principio el desarrollo de las plantas en suelos no contaminados era mejor que el del tratamiento de experimentación, Pero cada vez el vetiver iba siendo más eficiente bajo la influencia del petróleo. Como resultado final se concluyó que efectivamente el vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L). Roberty) es resistente y puede desarrollar en este suelo contaminado tan hostil. Realmente la presencia de vetiver no dejó notar una biodegradación del crudo, y su crecimiento y raíces se vieron afectados en el tamaño, que a comparación con el tratamiento sin contaminación, eran más pequeños.

⁴⁵Regine Brandt, R. S.-K. University of Münster, Institute of Landscape Ecology, Germany. En Potential of Vetiver (*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash) for phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils in Venezuela. (s.f.).

El siguiente estudio realizado también en Venezuela por: Duilio Torres Rodríguez⁴⁶, de la Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado. Unidad de Investigación de Suelos y Nutrición Mineral de Plantas; Adriana Cumana, Odalis Torrealba y Diana Posada, de la Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre. Programa de Ingeniería Química; llamado “Uso del vetiver para la fitorremediación de cromo en lodos residuales de una tenería”, se realizó a partir de 4 tratamientos: T1= lodo contaminado sin plantas de vetiver; T2= lodo contaminado + plantas de vetiver; T3= lodo contaminado + abono orgánico + plantas de vetiver; T4= abono orgánico + plantas de vetiver. El estado inicial del lodo proveniente de residuos de una industria de curtiembres, era de 21000 mg.Kg⁻¹. Durante los análisis se despreció el tratamiento 4, y los resultados obtenidos en cuanto a la concentración de Cr a los 15 días de siembra se tuvieron los siguientes: t1 = 21000 mg.Kg⁻¹, T2 = 13529 mg.Kg⁻¹ y por último el T3= 14137 mg.Kg⁻¹. Una muy notable disminución de las concentraciones, teniendo en cuenta incluso que la mayoría de plantas no soportan más de 0.03 y 0.2 mg.Kg⁻¹.

En el año 2005, Mónica P. Sacavo K.⁴⁷, ingeniera agrónoma de la Universidad Central de Venezuela llevo a cabo un estudio investigativo, del cual se produjo un artículo llamado “Estudio de un sistema de tratamiento de aguas residuales complementario, con pasto vetiver (*Vetiveria zizanioides* L.), provenientes de una planta de producción de gaseosas, en villa de cura, estado Aragua”. Se aclara que el nombre científico del pasto Vetiver actualmente es “*Chrysopogon zizanioides*”, debido a modificaciones taxonómicas por la comunidad científica.

Mediante la comparación de los niveles en los parámetros de calidad de agua, en afluentes y efluentes del sistema de tratamiento de aguas residuales, se plantearon cuatro tratamientos conformados por una exposición de tiempo de

⁴⁶Duilio Torres Rodríguez, A. C. SCIELO "Revista mexicana de ciencias agrícolas". En Uso del vetiver para la fitorremediación de cromo en lodos residuales de una tenería. 2010.

⁴⁷Mónica Scavo, O. R. Estudio de un sistema de tratamiento de aguas residuales complementario, con pasto vetiver (*Vetiveria zizanioides* L.), provenientes de una planta de producción de gaseosas, en villa de cura, estado aragua". (s.f.).

residencia (20, 15, 10 y 5 días), asociados a diferentes velocidades de flujo (30, 40, 60 y 120 L.dia⁻¹). Paralelo a cada tratamiento, fue llevado un tratamiento testigo (sin pasto Vetiver).

Como resultados de este estudio se obtuvieron datos muy interesantes, como por ejemplo, que el tratamiento 1, en el análisis de DBO y DQO, mostro una eficiencia de remoción del 96,86% y 98,87%; en el tratamiento 2, se presentó la mayor tasa de remoción de ST (solidos totales) con una eficiencia del 78,3%; y finalmente, en el tratamiento 4 se obtuvo la remoción más alta de SS (solidos suspendidos). Pero de manera general, al ser comparado con la PTAR de Pepsicola, el mejor comportamiento se obtuvo en el tratamiento 2.

4.1.5. Umbrales de tolerancia del pasto vetiver a Hg y Cd.

Se han realizado una serie de pruebas en invernadero para establecer la tolerancia del vetiver con Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd), aplicados individualmente (**Tabla 2**). El Vetiver puede sobrevivir y desarrollarse bien en condiciones de invernadero en suelos contaminados con múltiples metales pesados.

Tabla 2. Umbrales de tolerancia del pasto vetiver a Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd)

Metales pesados	Umbral de crecimiento de las plantas (mg/kg)		Umbral de crecimiento del Vetiver (mg/kg)	Umbral de crecimiento del Vetiver reportados en la literatura (mg/kg)	
	Nivel Hidropónico	Nivel en suelos	Nivel en suelos	Nivel en suelos	Niveles en el tallo
Cadmio (Cd)	0.2-9.0	1.5	20-60	60	45-48
Mercurio (Hg)	NA	NA	>6	17	>0.12

NA: No se ha registrado.

Fuente: Danh, P. T. (2015).

4.1.6. Posible acumulación de Mercurio (Hg) y Cadmio en el pasto vetiver.

El pasto vetiver se ha convertido en una planta excelente para la fitorremediación es su capacidad para tolerar y acumular una gran variedad de metales pesados, pese a que la mayoría de las plantas vasculares son muy sensibles a la toxicidad causada por metales pesados y sus límites de resistencia a metales, se puede evidenciar las posibles partes donde es acumulado los metales por el pasto Vetiver que son sus raíces y hojas en altas cantidades de los metales Mercurio y Cadmio (**Tabla 3**). El hecho de que la mayoría de los metales pesados se acumulan en las raíces y sólo un porcentaje pequeño lo hace en las hojas, hace que el pasto Vetiver sea muy apropiado para la fito- estabilización de suelos contaminados con metales pesados⁴⁸.

Tabla 3. Acumulación de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) en el pasto vetiver.

Metales pesados	Condición de suelo		Condición hidropónica	
	Raíces (mg/kg)	Hojas (mg/kg)	Raíces (mg/kg)	Hojas (mg/kg)
Mercurio (Hg)	NA	NA	1310	NA
Cadmio (Cd)	396	44	2232	93

NA: No se ah registrado.

Fuente: Danh, P. T. (2015).

Según Cristina Lomote⁴⁹ en el 2014 realizo un estudio titulado “El estudio de la distribución espacial de Mercurio en las raíces de vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L. Roberty)) por micro-PIXE Espectrometría” estableciendo un cultivo hidropónico durante 3 semanas en condiciones controladas y luego fue expuesto a Hg durante 10 días con o sin la adición de los quelantes, comprobando que el Hg fue localizada principalmente en la epidermis de la raíz y exodermis del vetiver⁵⁰.

⁴⁸Danh, P. T. El sistema vetiver para mejorar la calidad del agua. 2015.

⁴⁹Cristina Lomonte, y. W. Revista Internacional de fitorremediación . En el estudio de la distribución espacial de Mercurio en las raíces de vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) por micro-PIXE Espectrometría:

⁵⁰Cristina Lomonte, y. W. Revista Internacional de fitorremediación.2014.

La absorción de nutrientes y metales pesados por las plantas es generalmente el primer paso de su entrada en la cadena alimentaria, la cual es realizada por los pelos radiculares (**Figura 4**). Siendo esta la ruta del agua, nutrientes y metales pesados hasta las raíces; por medio de las rutas de apoplasto ó simplasto; jugando un papel importante de la Endodermis la banda de Caspary⁵¹.

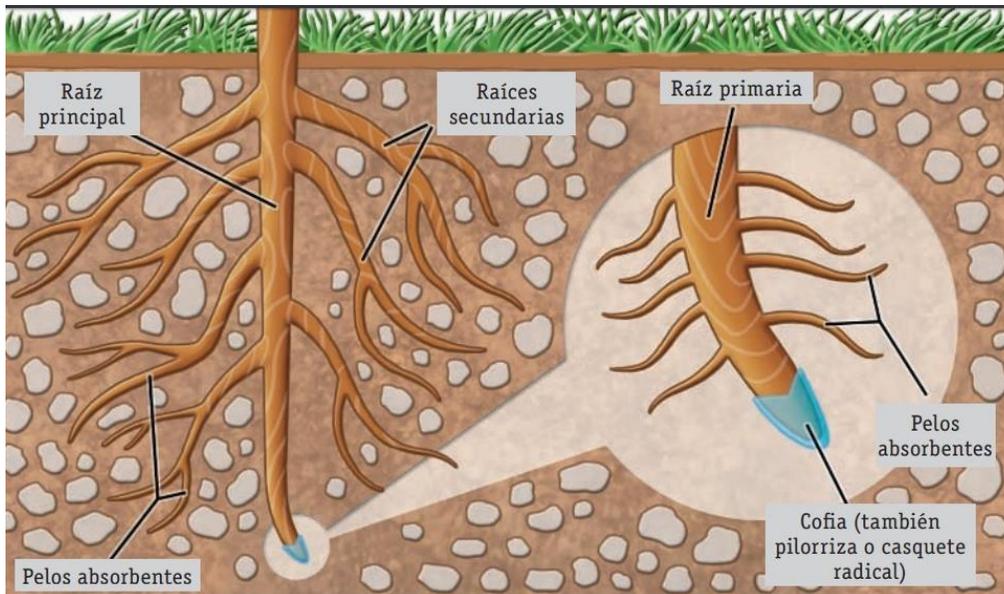


Figura 4. Absorción y transporte de agua, nutrientes y metales pesados por las células especializadas, llamadas pelos absorbentes. ; Fuente: El proceso de los nutrientes en las plantas. (s.f).

Después, los nutrientes tienen que atravesar los distintos tejidos de la raíz hasta llegar el xilema que, a su vez, los conducirá hasta el aparato fotosintético de la planta la cual puede seguir dos vías⁵².



La **vía transcelular o simplástica**, pasa de célula a célula a través de los plasmodesmos. Se realiza un transporte activo puesto que la concentración de sales minerales en el suelo y agua es menor que la concentración del interior de la planta, penetra en los tejidos de la raíz por osmosis.

⁵¹Sagan, L. M. El proceso de nutrición de las plantas. (s.f.).

⁵²Ibíd.

✓ La **vía extracelular o apoplástica**, esta aprovecha grandes espacios intercelulares existentes entre las células parenquimática del córtex de la raíz; mayor parte del agua y sales minerales aprovechan esta vía (**Figura 5**).

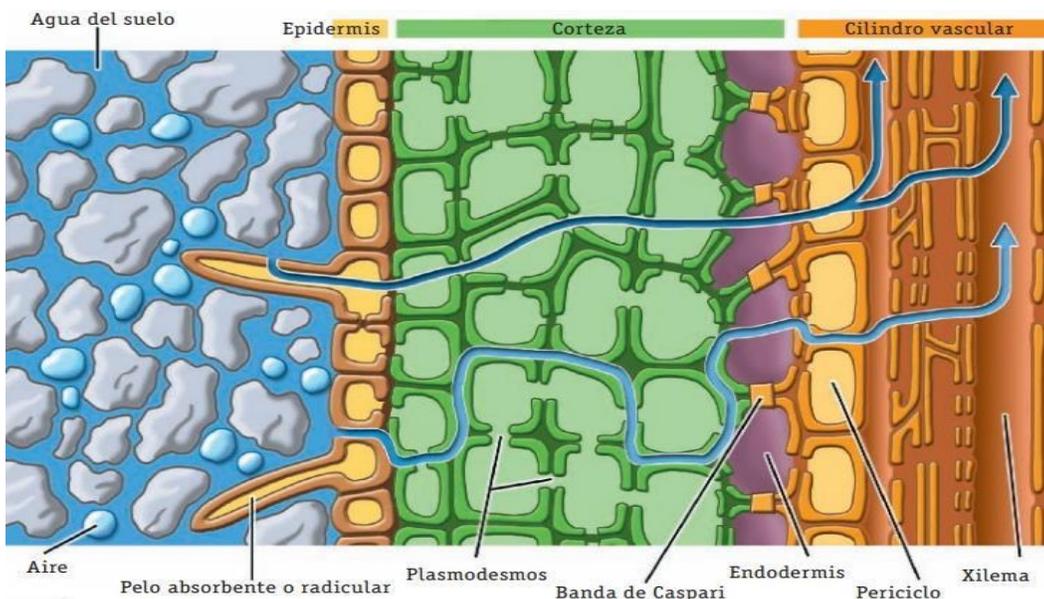


Figura 5. Corte transversal de una raíz. ; Fuente: El proceso de los nutrientes en las plantas. (s.f).

Existen tres categorías generales de procesos biotecnológicos en agua:

1. La precipitación extracelular.
2. La captación a través de biopolímeros purificados y de otras moléculas especializadas, derivadas de células microbianas.
3. La biosorción.

En este último “la biomasa viva o muerta, capta los metales a través de mecanismos fisicoquímicos como la adsorción o el intercambio iónico”⁵³.

La biomasa viva utiliza diferentes mecanismos para la captación de los metales pesados entre los cuales se destacan:

⁵³Saenz, Laura. Evaluación de un método para la remoción de mercurio y plomo con; *Pseudomona aeruginosa* inmovilizada sobre carbón activado granulada en tres muestras de agua del río Magdalena. Universidad de Cundinamarca. Programa de Ingeniería Ambiental. Pág 28. 2016.

1. **La bioacumulación:** Es la bioabsorción de las especies metálicas mediante los mecanismos de bioacumulación a través de las células como se observa en la figura 7.

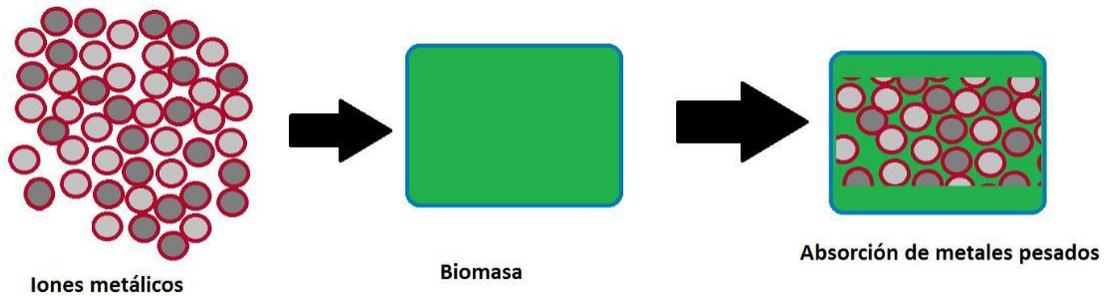


Figura 6. Bioacumulación de los metales en la biomasa viva. ; Fuente: Esta investigación.

2. **La bioadsorción:** Es la adsorción de los iones en la superficie de la célula, este fenómeno puede ocurrir mediante intercambio iónico, precipitación, complejación o atracción electrostática como se observa en la figura 8.

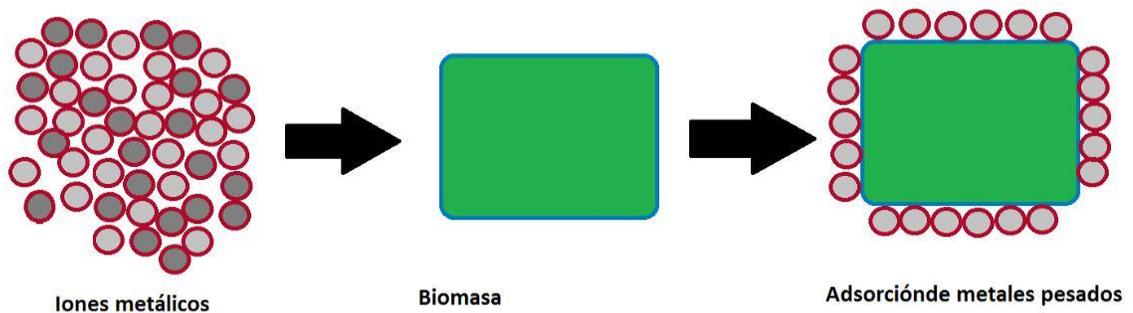


Figura 7. Bioadsorción de los metales en la biomasa viva. ; Fuente: Esta investigación.

En el proceso de esta investigación se descarta una posible desorción, debido a que según el estudio realizado por Mendoza, J.L.; Navarro, A.; Viladevall, M. y Doménech, L.M., llamado "Caracterización y tratamiento térmico de suelos contaminados por mercurio"⁵⁴, se comprobó que para el proceso de

⁵⁴Mendoza, J.L.; Navarro, A.; Viladevall, M. & Doménech, L.M. Caracterización y tratamiento térmico de suelos contaminados por mercurio. 2005.

descomposición termal de la mayoría de los compuestos de mercurio presentes en una muestra de suelo contaminada, se requiere la exposición de esta a temperaturas elevadas:

Tabla 4. Temperaturas de desorción de algunas especies de Hg.

Especies de Mercurio	Temp. De liberación de Hg en °C
Hg ⁰	< 80, < 150
Hg ₂ Cl ₂	170
HgCl ₂	< 250, 220
HgO	270-535, 160-435
HgS	300, 280-400, 210-310, 400
Hg en Piritita	450
Hg en Esfarelita	600
Hg – Substancias húmicas	200-300

Fuente: Gaona Martínez, Xavier. 2004.⁵⁵

4.1.7. Estudios bioacumulación en macrofitas.

Tabla 5. Acumulación de los metales pesados en las plantas acuáticas.

ESPECIE	RESULTADO	REFERENCIA
<i>Eichhornia crassipes.</i>	Acumulación máxima de 0,20 ppm en los brotes y 16,0 ppm en las raíces. A 1 ppm de mercurio se alcanzan las concentraciones máximas después de unos 16 días.	Riddle et al., 2002
<i>Eichhornia crassipes.</i>	Bioconcentración en los tejidos de las raíces dependiendo del tiempo y la concentración.	Lenka et al., 1990
<i>Eichhornia crassipes.</i>	2,79 mol Hg/g peso seco. Mayor acumulación en raíces que en brotes.	Jana, 1988
<i>Eichhornia crassipes.</i>	Contenidos de mercurio de 110-1.217 g/kg peso seco en invierno; (7,6-16,2) g/kg peso seco en verano. Tendencia del mercurio a permanecer en la raíz.	Ramos et al., 2000
<i>Hydrilla verticillata.</i>	Acumulación de 4,21 mol Hg/g peso seco	Jana (1988)
<i>Ipomoea aquatica.</i>	Mayor proporción de metales en las raíces, las cuales tienen mayor tolerancia que los brotes a las altas concentraciones internas de metal.	Göthberg et al., 2004
<i>Oedogonium areolatum.</i>	Acumulación de 3,35 mol Hg/g peso seco	Jana, 1988

Fuente: Arroyave, M. I., 2006

⁵⁵Gaona Martínez, Xavier. El mercurio como contaminante global. 2004

5. MARCO CONCEPTUAL

Absorción: Los organismos vegetales absorben por las raíces a nivel de la zona pilífera, nutrientes que necesitan para sus procesos biológicos. Estos nutrientes son absorbidos a través de unas células especializadas, que son los pelos absorbentes, que se encuentran en la zona pilífera de la raíz⁵⁶. Las raíces y las hojas de las plantas solamente absorben los nutrientes en forma de iones que se encuentran en la solución del suelo⁵⁷.

Adaptación Hidropónica: Es una herramienta que permite el cultivo de plantas sin suelo, es decir sin tierra cuyo crecimiento es posible gracias al suministro adecuado de los requerimientos hídrico-nutricionales, a través del agua y solución nutritiva⁵⁸.

Análisis de covarianza: Técnica estadística empleada cuando no se puede controlar una o más variables extrañas; con un experimento de bloques completos al azar⁵⁹.

Bioacumulación: Proceso por el cual los organismos vivos, incluyendo a los seres humanos, absorben contaminantes mucho más rápido de los que sus cuerpos pueden eliminar, por lo que el contaminante se acumula todo el tiempo⁶⁰.

Biotecnología ambiental: Es la aplicación de procesos biológicos modernos para la protección y restauración de la calidad del ambiente⁶¹.

Conductividad: Da una estimación acerca de la concentración aproximada de las sales minerales presentes en el agua⁶².

⁵⁶El Ministerio de Educación, C. y. La nutrición de las plantas. En Absorción de agua y sales por la raíz. (s.f.)

⁵⁷Infojardin. Absorción de nutrientes.2016.

⁵⁸Gimenez, J. B. CULTIVO EN HIDROPONÍA. En Introducción al cultivo hidropónico (pág. 10). 2015

⁵⁹SCORP. En Análisis de Covarianza.2006.

⁶⁰Serrano, L. B. Ambiente ecologico. En contaminación por Mercurio y sus consecuencias e impactos en la ecología y Población Rural. 2010.

⁶¹Noguera, N. G. Biotecnología ambiental y Biotecnología vegetal. En BIOTECNOLOGÍA. 2005.

⁶²Red, T. d. Estudio de la contaminación por metales pesados de la cuenca Llobregat. En Metales pesados y componentes mayoritarios en aguas. (s.f.).

Covariable: Variables continuas independientes que junto a una o más variables en los tratamientos, ayuda a explicar una variable de respuesta continua⁶³.

Densidad: Número de individuos de una especie que existe por unidad de área⁶⁴, en nuestro caso es el número de individuos presentes en cada cubeta plástica.

Evaporímetros: Son instrumentos destinados a medir el ritmo a que tiene lugar la evaporación en el seno de la atmósfera; la evaporación se expresa por la altura del agua evaporada, deduciéndola mediante lecturas diarias del nivel, previa corrección por la cantidad de agua caída en forma de precipitación cuando ésta tenga lugar.⁶⁵

Fitorremediación: Consiste en la remoción, transferencia, estabilización y/o degradación y neutralización de compuestos orgánicos, inorgánicos y reactivos que resultan ser tóxicos en el agua y suelo⁶⁶.

Higroscopicidad: Es una propiedad que poseen los materiales granulares que depende de la porosidad del material y está definida como la capacidad para absorber o ceder la humedad del ambiente que lo rodea⁶⁷.

Homocedasticidad: Hipótesis de igualdad de varianzas poblacionales en distintos grupos⁶⁸.

Homogeneidad: Igualdad mayor o menor de los valores de una variable o de una combinación de características en un conjunto geográfico⁶⁹.

Isolneas: Son parte de las representaciones graficas de áreas y se definen como líneas que unen puntos de igual valor o valor constante en el terreno, Estas líneas

⁶³ Glosarios de términos especializados. Términos estadísticos. En Covariable. 2011.

⁶⁴ Hernández, F. Asistencia técnica agrícola. En la densidad de siembra de los cultivos. (s.f.).

⁶⁵ Navarra, G. d. Meteorología y climatología de Navarra. 2012

⁶⁶ Angélica Evelin Delgadillo López1, C. A.-R. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. SCIELO "Tropical and subtropical agroecosystems". 2011.

⁶⁷ Rfael Esteban Ortega-Ortega, J. D.-H.-N. Revista Colombiana de Biotecnología. Obtenido de Acumulación de mercurio (Hg) por caña flecha (*Gynerium sagittatum*) (Aubl) Beauv. in vitro. 2005.

⁶⁸ Ibid. Términos estadísticos. En Homocedasticidad. 2011.

⁶⁹ Hypergé. En homogeneidad. 2014.

se pueden observar mejor en lo que comúnmente conocemos como curvas de nivel o Isohipsas, que son líneas que unen puntos de igual elevación⁷⁰

Método de comparación de Fisher: Utiliza la tasa de error individual y el número de comparaciones para calcular el nivel de confianza simultáneo para todos los niveles de confianza⁷¹.

Modelo bivariado: Incluye una variable dependiente y al menos una variable independiente⁷².

Potencial de hidrogeno (pH): Es una medida de la acidez o basicidad de una solución, determinando la concentración de iones o cationes hidrógeno [H+] presentes en determinada sustancia, la escala de pH se determina con una recta numérica que va desde el 0 hasta el 14; indicando que el número 7 pertenece a las soluciones neutras. El sector izquierdo de la recta numérica indica acidez, que va aumentando en intensidad cuando más lejos se está del 7.⁷³

Prueba de normalidad: genera una gráfica de probabilidad normal y realiza una prueba de hipótesis para examinar si las observaciones siguen o no una distribución normal⁷⁴.

Prueba de Shapiro-wilks: Esta prueba mide la fuerza del ajuste con una recta. Cuanto mayor sea este estadístico mayor desacuerdo habrá con la recta de normalidad, por lo que podremos rechazar la hipótesis nula. Esta prueba se usa para muestras inferiores a 30 casos⁷⁵.

⁷⁰ Eskakeados", P. E. Obtenido de METEOROLOGÍA - TIPOS DE ISOLÍNEAS Y FUNCIÓN QUE DESARROLLAN CADA UNA. 2016.

⁷¹ Minitab 17. En método de la diferencia significativa mínima de Fisher (LSD). 2016.

⁷² Universidad de Tarapacá. Análisis estadístico univariado, bivariado y variables control. (2012).

⁷³ Broky, M. L. Escuela normal "Juan P. Pringles". Laboratorio: PH. (s.f.)

⁷⁴ Quiñones, R. T. Universidad Nacional. En prueba de normalidad. 2011.

⁷⁵ Flores, S. E. Apéndice A. Prueba de normalidad de shapiro-wilk. (s.f.)

Rizofiltración: Eliminar del medio hídrico contaminantes a través de la raíz⁷⁶.

Salinidad: Es la cantidad total de sales disueltas presentes como cationes y aniones en un volumen determinado de agua⁷⁷.

Tasa de disminución: Expresar un cambio en un valor, por medio de un porcentaje⁷⁸.

Temperatura: Es un parámetro que nos revela que existe un contraste o gradiente de energía que provoca el transfer miento de calor, este factor es importante puesto que regula procesos vitales para los organismos vivos, así como también afecta las propiedades químicas y física de factores abióticos en un ecosistema.⁷⁹

Toxicidad: Grado de efectividad que poseen las sustancias que, por su composición, se consideran tóxicas⁸⁰.

⁷⁶ Angélica Evelin Delgadillo López, C. A.-R. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. SCIELO "Tropical and subtropical agroecosystems".2011.

⁷⁷ Mayagüez, U. d. Manual parte 2. parametros fisico-quimicos: SALINIDAD. (s.f.)

⁷⁸ J. Pérez Carballo, E. V. En Introducción a la gestión financiera de la empresa (pág. 164). Madrid .2013.

⁷⁹ Mayagüez, U. d. Manual parte 2. parametros fisico-quimicos: Temperatura. (s.f.)

⁸⁰ Bligoo. Toxiambiental. En glosario.(s.f.).

6. MARCO GEOGRÁFICO

6.1. Ubicación geográfica del río Bogotá

La cuenca del río Bogotá se encuentra localizada en el departamento de Cundinamarca y junto con los ríos Sumapaz, Magdalena, Negro, Minero, Suárez, Blanco, Gacheta y Mchetá, conforma el grupo de corrientes de segundo orden del departamento. Tiene una superficie total de 589.143 hectáreas que corresponden a cerca del 32% del total de la superficie departamental.

La Cuenca del río Bogotá limita en su extremo norte con el Departamento de Boyacá, en el extremo sur con el Departamento del Tolima, al occidente con los municipios de Bituima, Guayabal de Siquima, Albán, Sasaima, La Vega, San Francisco, Supatá y Pacho y al oriente, en el área incluida dentro del presente estudio es decir sin incluir la subcuenca del río Tunjuelo, con los municipios de Nilo, Tibacuy, Silvania, Chipaque, Ubaque y Choachi.

El río Bogotá constituye la corriente principal de la cuenca recorriendo desde su nacimiento a los 3300 m.s.n.m en el municipio de Villa pinzón, subcuenca río Alto Bogotá, hasta su desembocadura al río Magdalena a los 280 m.s.n.m en el municipio de Girardot, subcuenca río bajo Bogotá Apulo – Girardot, un total de 308 kilómetros. Las subcuencas de tercer orden ocupan cerca de la tercera parte 32% del área total de la subcuenca⁸¹.

Según el estudio realizado por la CAR⁸², determinó la precipitación, temperatura y evapotranspiración por medio de las isóneas y la distribución temporal de los parámetros más relevantes. La cuenca registra una precipitación entre 400 y 2200 milímetros anuales, la temperatura en la cuenca oscila entre los 6 y 30° C.

⁸¹CAR. Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Bogotá. Pág. 2, 3, 4,5. 2006

⁸²Ibid., Pág. 6.

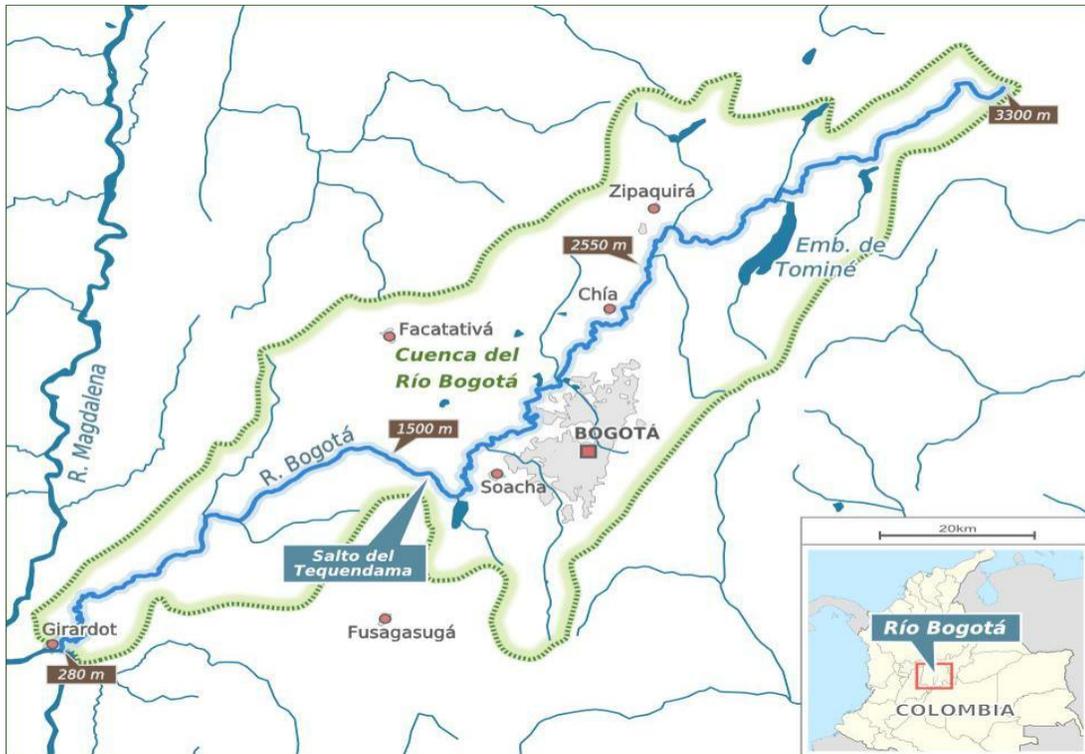


Figura 8. Mapa del río Bogotá. ; Fuente: Castro, F. S.; 2016



Figura 9. Las tres cuencas a lo largo de la trayectoria del río Bogotá. ; Fuente: Ramos, E.; 2014

6.2. Ubicación y características agroclimáticas de la hacienda el Silencio

La hacienda el Silencio, se localiza en el departamento de Cundinamarca; en el kilómetro 25 vía Girardot-Tocaima a 114 kilómetros de Bogotá, las coordenadas geográficas fueron tomadas del programa Pixelis⁸³ la cual la sitúa a 4° 26' 25.58622702466602" de latitud norte y a 74° 39' 50.498614311218184" de longitud oeste, con una altitud de 344.6 m.s.n.m; y según el plan de desarrollo de Tocaima, este sitio cuenta con una temperatura anual de 27° C.⁸⁴

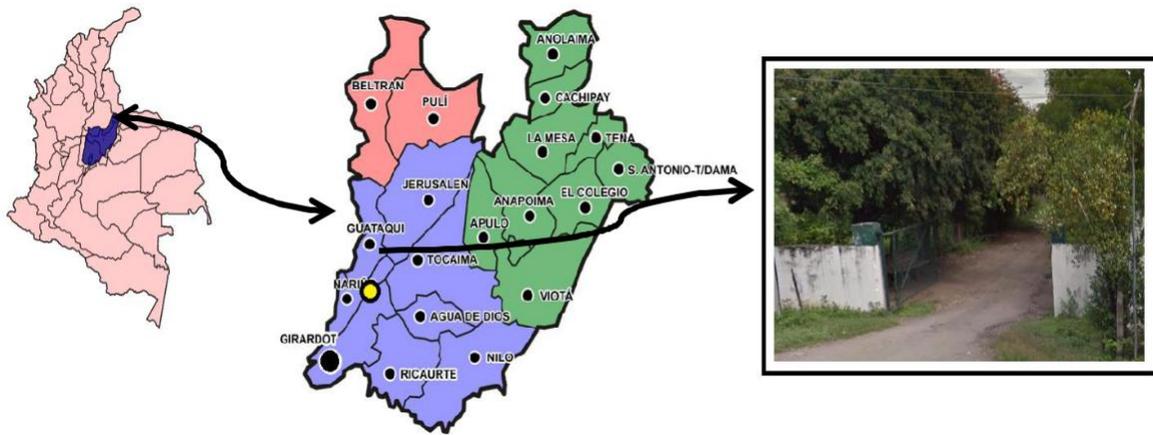


Figura 10. Ubicación de la hacienda el Silencio; Fuente: Esta investigación.

⁸³ Pixelis. En PixelisMaps.2015.

⁸⁴ PJRL. PLAN DE DESARROLLO TOCAIMA (2012 – 2015).

7. MARCO LEGAL

La normatividad ambiental que rige Colombia actualmente en la contaminación de los vertimientos al recurso hídrico por Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) son:

Tabla 6. Normatividad Colombiana

Normatividad	Artículo	Contenido
Decreto 2811 de 1974	13	Tasa retributivas de servicios ambientales.
	18,19	EL gobierno Nacional calculara por sectores de usuarios y por regiones que individualizaran, los cotos, correcciones o eliminación de los efectos nocivos al ambiente.
	32	Cualquier actividad que utilice sustancias radioactivas debe cumplir los requisitos necesarios para garantizar la protección del ambiente.
	134	Garantizar la calidad de agua.
	139	Se necesitan planes de desagüe, cañerías y alcantarillados y disposición de aguas residuales, previamente aprobados.
	145	Cuando las aguas servidas no puedan llevarse a sistemas de alcantarillado, su tratamiento deberá hacerse de modo que no perjudique las fuentes receptoras, los suelos, la flora o fauna.
	163	Sanciones, normas que rigen las concesiones de agua.

<p>Decreto 1541 de 1978 (Derogado por el decreto 2858 de 1981)</p>	1	<p>Las Corporaciones Regionales de Desarrollo podrán otorgar permisos especiales hasta por el término de un año, para la realización de estudios de factibilidad sobre aprovechamiento de aguas con destino a la formulación de proyectos de riego a nivel de finca o grupos de fincas, cuando el costo de tales estudios y de las obras civiles correspondientes vayan a ser financiados con recursos del Banco de la República en los términos de la Resolución número 28 de 1981 expedida por la Junta Monetaria, o de las disposiciones que se expidan con igual finalidad.</p>
	6	<p>Las concesiones de agua en los términos del presente decreto podrán ser otorgadas hasta por veinte años, su vigencia está condicionada al otorgamiento del crédito para financiar las obras de infraestructura física.</p>
<p>Decreto 4728 de 2010 (Modifica parcialmente el decreto 3930 de 2010)</p>	1	<p>Fijación de la norma de vertimiento</p>
	2	<p>Protocolo para el Monitoreo de los Vertimientos en Aguas Superficiales y Subterráneas</p>
	6	<p>Plan de Reconversión a Tecnologías Limpias en Gestión de Vertimientos</p>
<p>Decreto 2667 de 2012</p>	8	<p>Se reglamenta la tasa retributaria por la utilización directa e indirecta de agua como receptor de los vertimientos puntuales.</p>

Ley 9 de 1979		Protección del ambiente, por la cual se dictan Medidas Sanitarias.
Resolución 2115 de 2007	5,7	Características químicas que tienen efectos en la salud humana y consecuencias económicas e indirectas.
Resolución 0631 de 2015	8,9,10,11,12,13,14,15,16. Aplican los mismos valores de vertimiento (según actividad en el decreto 3830/10, del art. 28) a cuerpo de agua superficial.	Establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Fija los valores máximos permisibles de Cadmio en instalaciones existentes 0,04 mg/L y en instalaciones nuevas 0,01 mg/L, para el Mercurio (Hg) en instalaciones existentes o nuevas 0,01 mg/L.
Resolución 1207 de 2014	7	Estable los criterios de calidad para el uso de agua residual tratada deberá cumplir previamente los siguientes criterios de calidad:

Fuente: Esta investigación.

Para la protección de la cuenca del río Bogotá la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) reglamenta:

Tabla 7. Normatividad para la cuenca del río Bogotá.

Normatividad	Contenido
Decreto 2667 de 2012	La utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones.
Acuerdo 043 de 2006	Establece los objetivos de calidad para el agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020.

Fuente: Esta investigación.

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC establece algunas normas:

Tabla 8. Normas Técnicas.

Norma Técnica 813 (segunda actualización)	Norma oficial para la calidad de agua colombiana.
--	---

Fuente: Esta investigación.

La red Colombiana de Vetiver establece las normas técnicas de la tecnología vetiver para la implementación en control de erosión y protección de infraestructura en la cual nombra la técnica de plantación y mantenimiento. Además da una idea para elaborar la unidad de medida que se necesita en cierto territorio.

8. METODOLOGÍA

Este es un estudio experimental en el que se determinó la eficiencia del pasto vetiver para remover mercurio y cadmio con agua de la cuenca baja del río Bogotá, en el que se manipula como variables independientes la densidad de siembra y el tiempo de exposición, analizando la influencia de tres covariables: Conductividad, pH y Temperatura, en la disminución de Hg y Cd.

Esta investigación se divide en dos fases; la primera fase consistió en cuantificar la evaporación del agua en el sitio que se realizó la investigación, en conjunto con la adaptación hidropónica de las macollas del pasto vetiver. Después de esto, como segunda fase, se instalaron los tratamientos poniendo a prueba el pasto vetiver durante tres meses, tiempo en el que se realizaron mediciones mensuales en el agua de la concentración de mercurio y cadmio, midiendo al mismo tiempo las covariables: Conductividad, pH y Temperatura.

8.1. Universo, población y muestra.

- **Universo:** Río Bogotá
- **Población:** Cuenca baja
- **Muestra:** Tramo Girardot – Tocaima

8.2 Fase 1

8.2.1 Evaporímetros artesanales.

Se tomó agua cruda de un canal de riego cercano a la zona urbana de Tocaima - Cundinamarca, cuyas aguas son provenientes de la cuenca baja del río Bogotá, a las cuales no se les realiza ningún tratamiento previo para su distribución. Con esta agua se realizó una simulación con evaporímetros artesanales (**Figura 11**), con el fin de hallar un método aproximado para evitar la pérdida de agua por evaporación, debido a que en esta zona la evaporación anual es de 1300 mm⁸⁵.

⁸⁵ Méndez Cárdenas, L. I. Alternativas de abastecimiento del recurso hídrico en la cuenca del río Calandaima en Cundinamarca-Colombia. Bogotá, DC, Colombia.2014.

Los evaporímetros fueron ocho botellas plásticas recicladas de un litro de capacidad, las cuales fueron distribuidas de la siguiente forma:



Figura 11. Establecimiento de evaporímetros artesanales.
Fuente: Esta investigación.

- 2 botellas (una transparente y otra pintada de azul), enterradas en el suelo a la mitad de su altura, bajo polisombra de 50%.
- 2 botellas (una transparente y otra pintada), enterradas en el suelo a la mitad de su altura, a exposición directa del sol.
- 2 botellas (una transparente y otra pintada), sobre la superficie del suelo, bajo polisombra de 50%.
- 2 botellas (una transparente y otra pintada), sobre la superficie del suelo, a exposición directa del sol.

Este proceso se describe en la figura 12, la cual duro veintiún días, en los que se realizaron dos mediciones por semana, principalmente de las variables: Altura del agua (cm) y temperatura (°C); y en segunda instancia de salinidad (ppm) y pH, con el fin de monitorear estas variables relacionadas con los metales pesados, en especial la salinidad. Estas mediciones se realizaron con el equipo multiparámetro EC500 (**figura 13**)

8.2.2 Adaptación hidropónica.

Paralelamente al proceso anterior, se llevó a cabo la compra de 289 macollas de pasto Vetiver (**Figura 14**), compuestas cada una por aproximadamente dos plántulas, para un total de 578 plántulas para realizar el proceso de adaptación hidropónica en la zona urbana del municipio de El Espinal – Tolima, lugar escogido para poder realizar un monitoreo constante. De estas plántulas se estimó un 7% de mortalidad basados en las características de resiliencia que posee el pasto Vetiver y asumiendo que debe ser menor al 10%⁸⁶.



Figura 14. Macollas del Pasto Vetiver. ; **Fuente:** Esta investigación.

La adaptación hidropónica del pasto vetiver se realizó según el procedimiento sugerido por Asprilla⁸⁷ en su “protocolo para rizofiltración de efluentes contaminados con Mercurio mediante la aplicación de filtros vegetales con la especie Vetiver” (Figura 15), donde se desinfectaron las macollas con detergente en polvo, algunas gotas de hipoclorito de sodio y agua (Figura 16). Se realizaron cortes a quince centímetros en el área foliar y a cinco centímetros en el sistema radicular (Figura 17). Para el proceso se usaron 173 botellas plásticas recicladas

⁸⁶Sanchez, S., & Murillo, O. Desarrollo de un método para controlar la calidad de producción de plántulas en viveros forestales: estudio de caso con ciprés. 2004.

⁸⁷Asprilla, N. I. Desarrollo de un protocolo para la rizofiltración de efluentes contaminados con mercurio mediante la aplicación de filtros vegetales con la especie vetiver (*Vetiveria zizainodes*). Universidad de Manizales. 2013.

con una capacidad de tres litros (Figura 18), en las cuales fueron depositadas las macollas. Estas botellas fueron aforadas con agua de grifo sin tratamiento y, puestas sobre una plancha de concreto con una exposición directa a la luz solar (Figura 19). El proceso duro cinco meses y las plántulas que se desarrollaron en ese sistema, fueron usadas en sus condiciones finales para establecer los tratamientos.

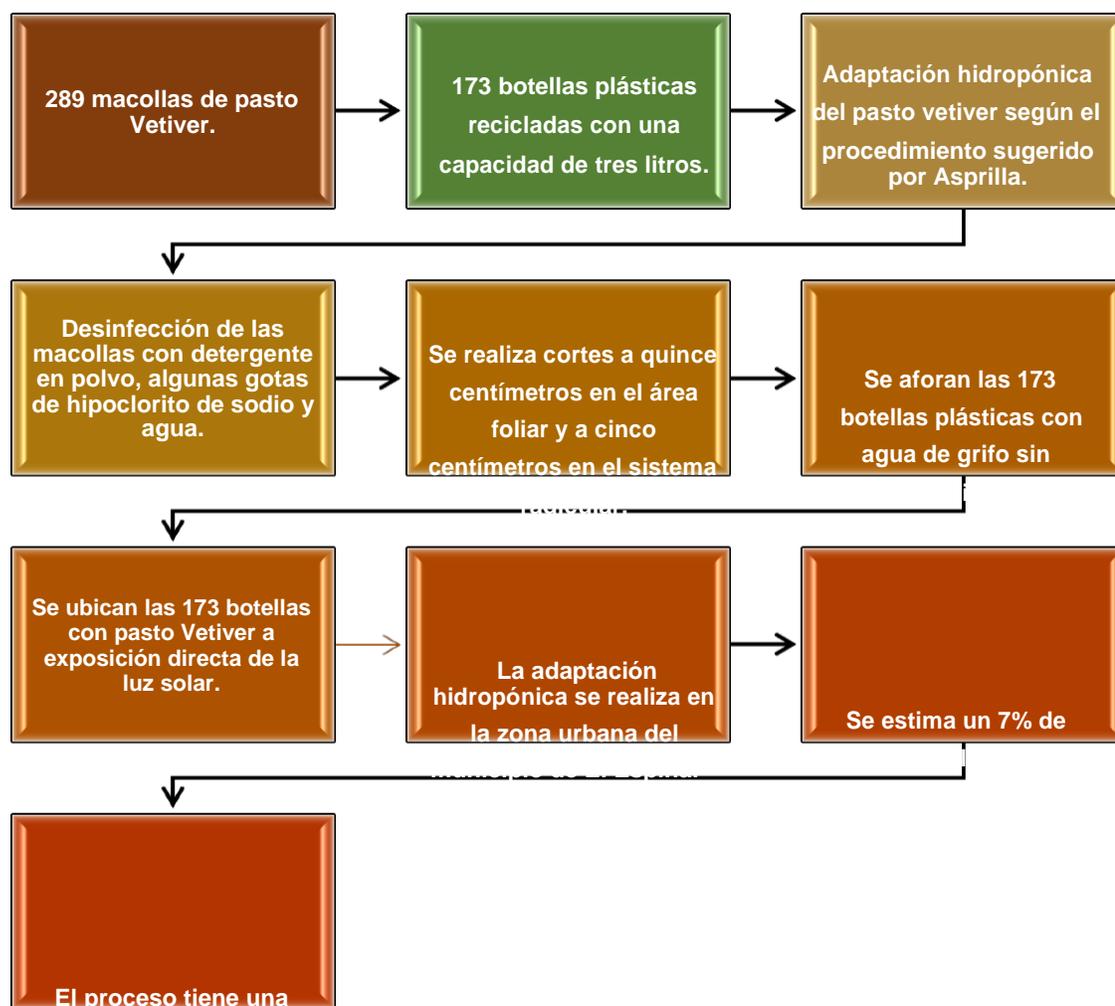


Figura 15. Procedimiento para el establecimiento de la adaptación hidropónica. ; **Fuente:** Esta investigación.



Figura 16. Desinfección de las macollas. ; Fuente: Esta investigación.



Figura 17. Corte de raíz y parte foliar del pasto vetiver
Fuente: Esta investigación.



Figura 18. Botellas plásticas de 3L. ; **Fuente:** Esta investigación.



Figura 19. Exposición directa a la luz solar. ; **Fuente:** Esta investigación.

8.3 Fase 2

8.3.1 Establecimiento de los tratamientos.

Para el establecimiento de los tratamientos (Figura 20), se construyó una infraestructura de protección contra la lluvia, que contaba con un techo en plástico translucido y una cerca en alambre de pua para evitar el ingreso de bovinos (Figura 21). En primera instancia se planteó la preparación de una muestra sintética contaminada con los metales de interés (Hg y Cd), para determinar la eficiencia del *Chrysopogon zizanioides* (L. Roberty) para su remoción. Sin embargo esta propuesta se replanteo debido a que el diseño experimental usado requería, por cuestiones morfológicas del pasto (exposición directa al sol) y ambientales (evaporación), el uso de 13 canecas con un volumen de 55 galones cada una, que equivaldrían a 2.706,57 litros de agua que debía ser contaminada con dos de los metales más tóxicos del mundo, y posteriormente, esta agua debía ser tratada y tener una disposición final adecuada, que incrementaría los costos y riesgos.

Por este motivo se optó por usar agua de la cuenca baja del río Bogotá debido a que según sus antecedentes históricos, es una de las cuencas de mayor contaminación en Colombia, que contiene altas concentraciones de Mercurio y Cadmio, según la Corporación Autónoma Regional en el 2009⁸⁸, informa que el “Río Bogotá recibe un total de 51,62 Toneladas/mes de metales pesados provenientes de vertimientos industriales”. Por estos motivos, además de motivos morales, fue más viable para la presente investigación el uso de un agua ya contaminada.

⁸⁸CAR. Evaluación ambiental y plan de gestión ambiental. Obtenido de Río Bogotá, adecuación hidráulica y recuperación ambiental. 2009.

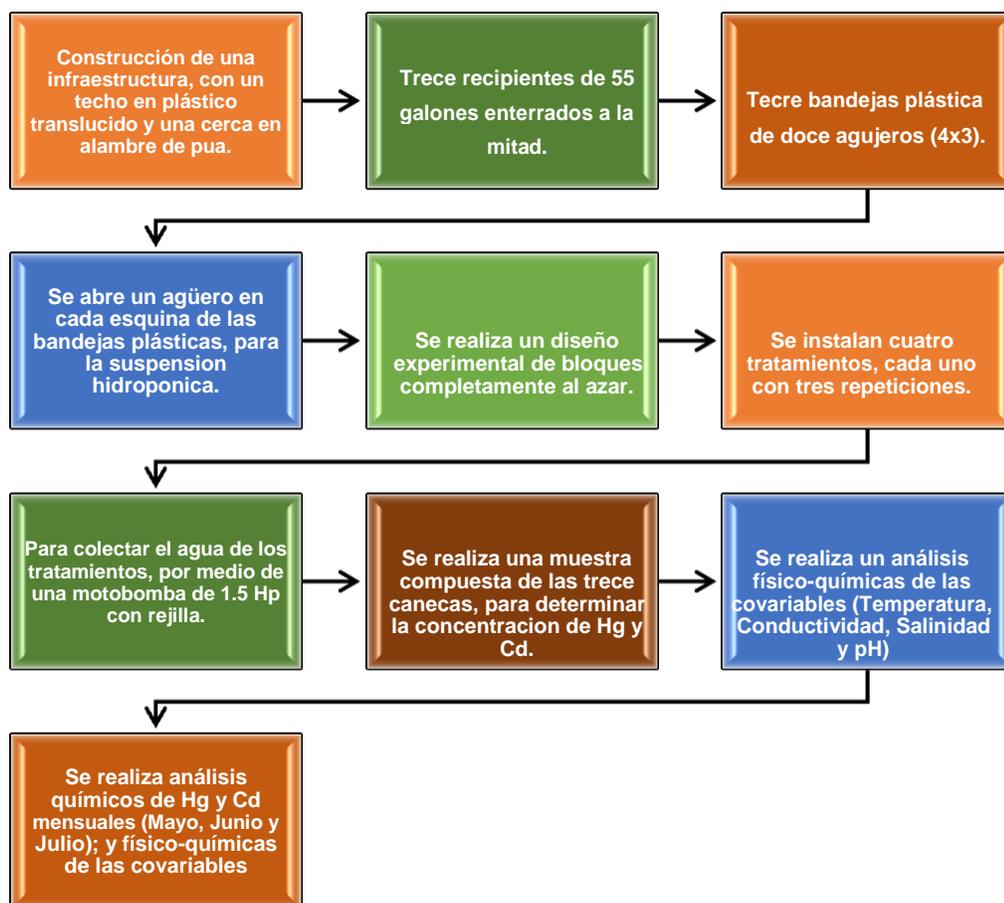


Figura 20. Procedimiento para el establecimiento de los tratamientos. ; **Fuente:** Esta investigación.

Los trece recipientes de 55 galones fueron enterrados a la mitad, y en cada uno de ellos se colocó una bandeja plástica de doce agujeros (4x3), adaptándolas a un sencillo sistema de flotamiento; utilizando un taladro para abrir un agujero en las esquinas para amarrar cada bandeja con fibra plástica, para mantenerlas flotando a nivel (Figura 22).



Figura 21. Infraestructura de protección contra la lluvia. ; Fuente: Esta investigación.



Figura 22. Sistema de flotamiento. ; Fuente: Esta investigación.

El diseño experimental fue de bloques completamente al azar, se instalaron cuatro tratamientos, cada uno con tres repeticiones. Los tratamientos consistieron en las diferentes densidades de siembra (Tabla 9) cada agujero contenía seis plántulas.

Tabla 9. Tratamientos del experimento

Tratamiento	Densidad de Siembra (%)	Número de plántulas
T0	0%	0
T1	25%	18
T2	50%	36
T3	75%	54
T4	100%	72

Fuente: Esta investigación.

Para coleccionar el agua de los tratamientos, se utilizó una motobomba de 1.5 Hp con rejilla (Figura 23). El agua captada fue sometida a un análisis para determinar la presencia y concentración de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) mediante el análisis por absorción atómica de una muestra compuesta de las trece canecas que fue enviada al laboratorio de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria CORPOICA. También fueron monitoreadas las características físico-químicas establecidas como covariables (Temperatura, Conductividad, Salinidad y pH), en cada uno de los cuatro tratamientos y replicas.



Figura 23. Motobomba de 1.5 Hp con rejilla. ; **Fuente:** Esta investigación.

Luego de instalados los tratamientos se realizaron análisis químicos de Hg y Cd mensuales (Mayo, Junio y Julio), en muestras enviadas al mismo laboratorio inicial; en conjunto se realizó el registro de datos de las covariables: Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), pH y Temperatura ($^{\circ}\text{C}$).



Figura 24. Muestras de agua enviadas a CORPOICA. ; Fuente: Esta investigación.

8.4 Técnicas o instrumentos para la recolección de datos.

- ❖ Manual de pasto vetiver.
- ❖ Desarrollo de un protocolo para la rizofiltración de efluentes contaminados con mercurio mediante la aplicación de filtros vegetales con la especie vetiver (*Vetiveria zizanioides*).
- ❖ Toma de muestras de aguas residuales (IDEAM).
- ❖ Multiparámetro EC500
- ❖ HandyLab 200 (SI Analytics)
- ❖ HandyLab 200 (SI Analytics)
- ❖ Tubo de PVC 1"
- ❖ Cinta métrica
- ❖ Análisis físico químicos

8.5 Análisis de Evaporímetros Artesanales.

La velocidad de la evaporación en la zona donde se instalaron los tratamientos es un factor de primordial antes de poner en marcha la fase experimental. Por este motivo para determinar la velocidad de pérdida de agua en la cuenca baja del río Bogotá, se elaboraron evaporímetros artesanales expuestos a condiciones diferentes (Color: Transparente y azul rey; Área expuesta al aire libre: expuesta completamente y enterrada al 50%; Exposición al sol: Directa y bajo polisombra.), que fueron instalados en la hacienda El Silencio (Lugar de instalación de los tratamientos); con el fin de evaluar la pérdida de agua mediante los centímetros (cm) que disminuyo la columna de agua en cuatro semanas a la intemperie.

Después de este tiempo se determinó que evaporímetro con su respetiva condición fue más efectivo hallando el menor porcentaje de perdida de agua. Este análisis se emplea con el objeto de determinar el color de las canecas y si deben estar enterradas puesto que este factor puede influir negativamente en los análisis de las muestras de agua, debido a que el (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) se expuso a un tiempo de tres meses.

8.6 Análisis Físico Químicos

Para los análisis químicos se usaron botellas plásticas de 350 ml esterilizadas, las cuales fueron usadas para tomar las muestras de agua a intervalos de un mes bajo la metodología de Toma de muestras de aguas residuales (IDEAM). Estas muestras fueron enviadas al Laboratorio de CORPOICA (Mosquera) para determinar la concentración de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) mediante el método de absorción atómica. Simultáneamente fueron monitoreadas las variables pH, Conductividad y Temperatura, estos registros se analizaron en el paquete estadístico INFOSTAT para determinar la relación que existe con las variaciones de concentraciones de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd).

Inicialmente se planteó en el anteproyecto la determinación de la tasa de absorción que podría brindar el vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty), pero ante la falta de instrumentación del laboratorio de la Universidad de Cundinamarca y las dificultades económicas para realizar los análisis bromatológicos pertinentes en otro laboratorio, se optó por establecer una tasa de reducción probable de los metales pesados en los tratamientos con el pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty) producto ajustado al alcance y capacidades de los investigadores.

8.7 Análisis estadístico

La tabulación de los datos y los gráficos se realizaron en el programa Microsoft Excel. Para el análisis estadístico de los datos se seleccionó el análisis de covarianza, ya que permite evaluar el efecto de factores controlados en un experimento, y también el de las covariables, que son variables a las que se les hizo seguimiento pero no se controlaron⁸⁹. En el presente estudio los factores controlados son la densidad de pasto Vetiver y el tiempo de exposición, mientras las covariables son el pH, la conductividad y temperatura. El análisis de covarianza fue realizado usando el paquete estadístico INFOSTAT; verificando los supuestos de normalidad y homocedasticidad de los residuos, por medio de los test de Shapiro-Wilky Levene respectivamente.

Los análisis correspondientes, realizados con el software INFOSTAT, fueron corridos bajo un modelo bivariado, tomando la conductividad, el pH y la temperatura como covariables, es decir, haciendo un análisis de covarianza para el modelo $y_{ij} = \mu + \tau_i + \tau_j + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon_{ij}$ en el que τ_i representa los efectos del tiempo, τ_j el efecto de las densidades y X_1, X_2, X_3 las covariables.

⁸⁹Urdaneta, U. R. Programa interactivo de Análisis estadístico. Obtenido de Capítulo VI Análisis de Covarianza (s.f.).

9 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.2 Análisis de la evaporación.

En el ensayo con los evaporímetros artesanales se observó que la botella azul enterrada, expuesta al sol, tuvo una disminución en el nivel del agua de un 33.3%, al ser esta la menor disminución se optó por replicar a escala mayor las condiciones de este evaporímetro, usando canecas de (55) galones de color azul enterradas a la mitad, para el establecimiento de los tratamientos con el fin de garantizar al máximo la inmersión del sistema radicular del pasto Vetiver, puesto que para el proceso de rizofiltración, según Núñez, Mesa y Ortega⁹⁵, se hace énfasis en el uso de la raíz para absorber metales pesados, motivo por el cual la permanencia de ésta en el agua a tratar es muy importante.

Tabla 10. Mediciones de altura del agua en los evaporímetros durante (3) semanas.

Evaporímetros	Inicial/Altura	1Semana	2Semana	3Semana	disminución n	de%
Botella T.SE.S	22.5	16.5	12.5	12	46.6%	
Botella A.SE.S	22.5	S/D	S/D	S/D	S/D	
Botella T.E.S	22.5	15.5	14.5	12.5	44.4%	
Botella A.E.P	22.5	16	12.5	11.5	43.8%	
Botella T.SE.P	22.5	16.8	15	14	37.7%	
Botella A.SE.P	22.5	16	13.5	11	51.5%	
Botella T.E.P	22.5	17.5	16	14	37.7%	
Botella A.E.S	22.5	17	16	15	33.3%	

S/D: Sin datos; **T.SE.S:** Transparente sin enterrar, expuesta al sol; **A.SE.S:** Azul sin enterrar, expuesta al sol; **T.E.S:** Transparente enterrada, expuesta al sol; **A.E.S:** Azul enterrada, expuesta al sol; **T.SE.P:** Transparente sin enterrar, expuesta a polisombra; **A.SE.P:** Azul sin enterrar, expuesta a polisombra; **T.E.P:** Transparente enterrada, expuesta a polisombra; **A.E.P:** Azul enterrada expuesta a polisombra; Los registros **S/D** fueron causados por la pérdida del evaporímetro: Botella **A.SE.S**, por motivos agentes externo, posiblemente haya sido el viento o la acción de algún animal.

Fuente: Esta investigación.

⁹⁵Núñez Lopez, R. A., Mesa Vong, Y., & Ortega Borgues, R. Rizofiltración, lixiviación y electro-recuperación: una propuesta integral para el tratamiento de aguas contaminadas con plomo a partir del lirio acuático (*Eichhornia crassipes*). Ciencia. 2009

9.3 Eficiencia de la Adaptación Hidropónica.

El proceso de adaptación hidropónica tuvo una eficiencia del **94,46%**, terminando con (546) plántulas adaptadas al medio acuático y con una mortalidad del **5,54%**, un dato mucho menor al que se había estimado en la planificación de esta fase. Asprilla⁹⁶ afirma claramente que: “el vetiver es una gramínea que puede ser usada bajo condiciones hidropónicas, puesto que es nativa de ambientes higroscópicos, como humedales, lagunas pantanosos y extremadamente tolerante a sequías”.

9.4 Análisis de Mercurio (Hg) y Cadmio (Cd) Inicial.

En el momento en que fue tomada la muestra inicial de Hg y Cd, fueron medidas las condiciones iniciales consideradas relevantes (Tabla 11). Las concentraciones iniciales de Hg y Cd: 0,7 mg/L y 0,09 mg/L; superan las concentraciones admisibles para el uso de aguas residuales tratadas para cultivos de pastos y forrajes, según la Resolución 1207 del 2014, donde se establecen valores límites máximos permisibles para Cadmio: 0,01 mg/L; y Mercurio: 0.002 mg/L.

De igual manera la concentración inicial (Hg: 0.7 mg/L; Cd: 0.09 mg/L) sobrepasa las concentraciones que establece La Resolución 2115 del 2007, en el capítulo II, donde afirma que los valores máximos aceptables de Hg y Cd para evitar efectos adversos a la salud son 0,001 mg/L y 0,003 mg/L respectivamente

En un estudio realizado por Villa, Escobar, Ayala, Mortera, Bello, Ortigoza⁹⁷ llamado “Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México” se analizaron los metales pesados de en un cuerpo de agua usado para riego agrícola, recreación y uso doméstico. Las concentraciones

⁹⁶Asprilla, N. I. Desarrollo de un protocolo para la rizofiltración de efluentes contaminados con mercurio mediante la aplicación de filtros vegetales con la especie vetiver (*Vetiveria zizainodes*). Universidad de Manizales. 2013.

⁹⁷Oscar Raúl MANCILLA-VILLA, H. M. Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México. Revista internacional de contaminación ambiental SCIELO. 2012.

encontradas de Hg ($0,005 \text{ mg.L}^{-1}$) y Cd ($0,01 \text{ mg.L}^{-1}$) fueron menores que las encontradas en esta investigación.

La muestra de esta investigación fue tomada el 04 de abril de 2016, fecha que el IDEAM aseguró, estaba dentro de una continuación del fenómeno del niño que tuvo el año 2015. Este fenómeno como tal, abarco hasta el primer trimestre del año 2016, según agencias internacionales que notificaron al Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible y al IDEAM. Según la fecha en que se muestreo y los datos de la innegable “sequia”, se atribuye la alta concentración de estos metales pesados a la disminución de la dilución y a un flujo del agua más cercano al fondo de lodos, que es el lugar de concentración de los metales pesados, generando un aumento en las partículas en suspensión⁹⁸.

Tabla 11. Características físico- químicas del canal de riego del día 4 de abril del 2016.

PARÁMETROS	
Temperatura	28,1°C
Conductividad	677 $\mu\text{S/cm}$
pH	7,75
Hg	0,7 mgL^{-1}
Cd	0,09 mgL^{-1}

Fuente: Esta investigación.

9.5 Reducción en la concentración de mercurio y cadmio en los tratamientos.

En primera instancia se evidencia en las figuras 25 y 26 que en el tratamiento testigo o blanco (sin vetiver), las concentraciones de Hg y Cd presentaron una disminución. Esta variación evidenciada entre el primer mes y el segundo, posiblemente se deba al ingreso de agua lluvia en el tratamiento testigo, por una ruptura del plástico que protegía la infraestructura de los tratamientos. Pero se confirma que la concentración de Hg y Cd no debían variar, al observar las

⁹⁸Marqués, A., Senior, W., & Martínez, G. Concentraciones y comportamientos de metales pesados en una zona estuarina de Venezuela. Venezuela. Pág. 25, 6, 290. 2000

concentraciones del blanco previas y posteriores al incidente, donde estas no cambian.

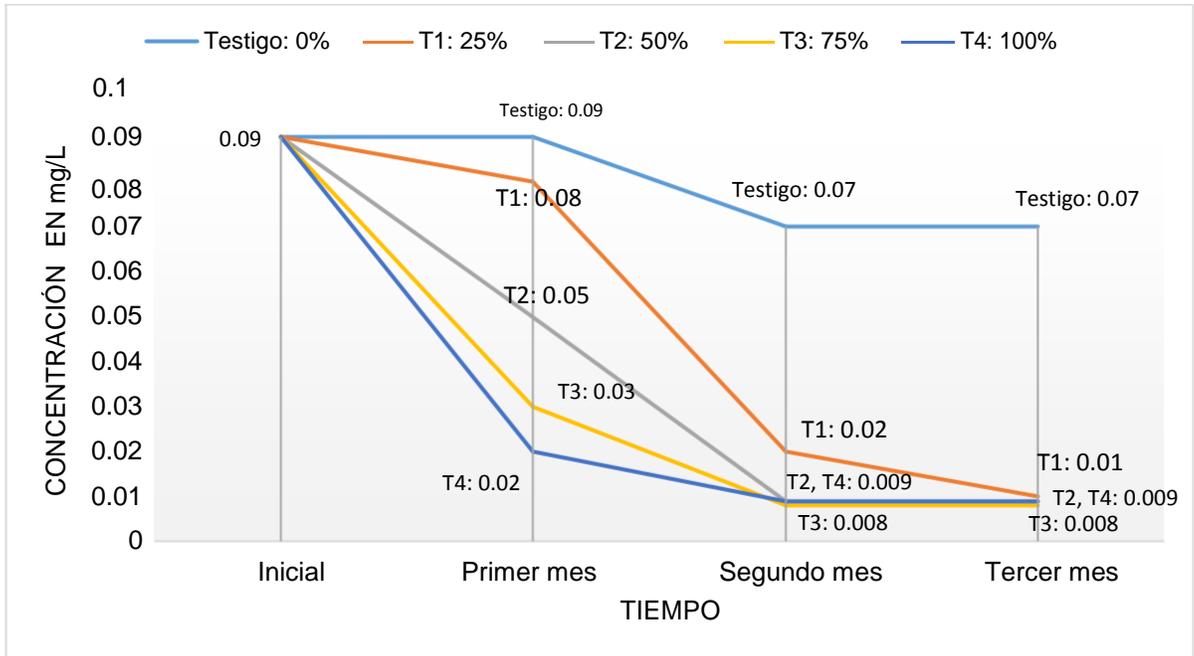


Figura 25. Variación en la concentración de Cadmio a diferentes densidades de siembra durante el experimento. ; **Fuente:** Esta investigación.

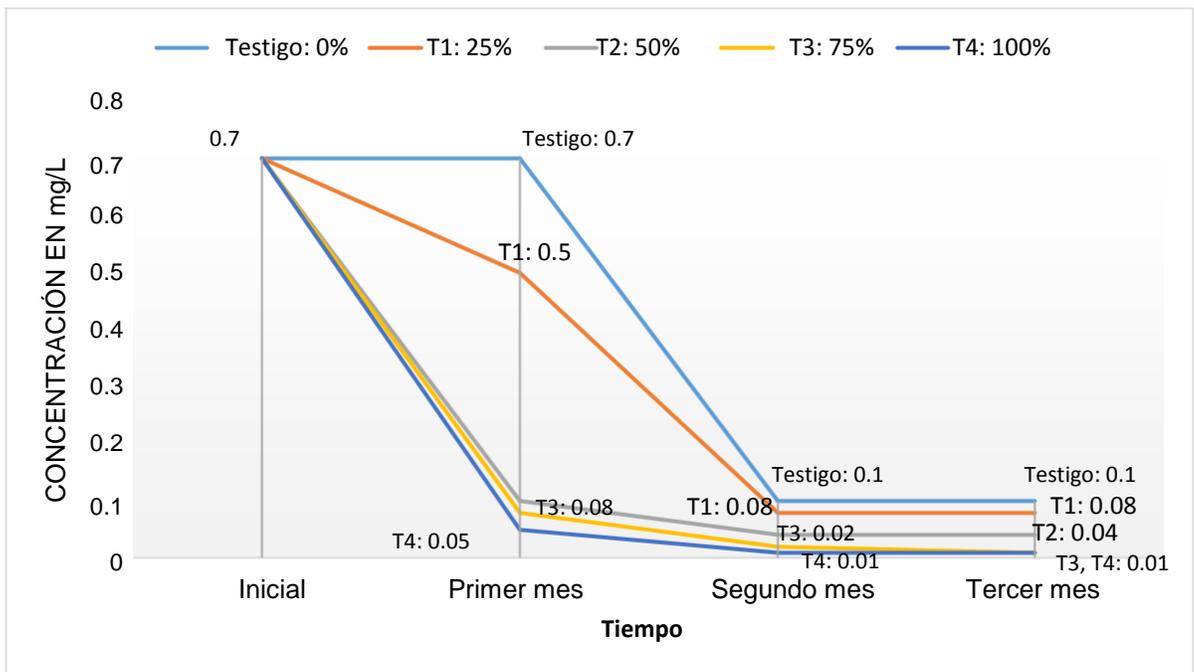


Figura 26. Variación en la concentración de Mercurio a diferentes densidades de siembra durante el experimento. ; **Fuente:** Esta investigación.

Al comparar las concentraciones final e inicial de los metales en cada tratamiento, se observa un comportamiento de disminución distinto al esperado (Tabla 12), ya que se suponía que a mayor densidad de siembra se daría una mayor reducción en la concentración de éstos metales. En el caso del mercurio, la tendencia esperada se observó con las densidades 25% y 50%, sin embargo las densidades 75% y 100% presentaron la misma reducción de 0,23 mg/mes (Figura 27). La reducción en la concentración de Cadmio presentó una relación directa con la densidad en los tratamientos 1,2 y 3 (25%,50% y 75%), siendo este último en el que se da la mayor reducción en mg/mes; en el tratamiento con densidad de 100%, la reducción obtenida es igual a la del tratamiento con 50% (Figura 28).

Tabla 12. Registro de reducción de las concentración de Mercurio y Cadmio en los tratamiento.

Fecha	Medición	Tratamiento	Resultado mg/L		% de Reducción de Hg	% de Reducción de Cd
			Hg	Cd		
04/04/2016	Inicial	-	0.7	0.09	-	-
04/05/2016	Primer mes	T1	0.5	0.08	28.6%	11.1%
		T2	0.1	0.05	85.7%	44.4%
		T3	0.08	0.03	88.6%	66.7%
		T4	0.05	0.02	92.9%	77.8%
		Blanco	0.7	0.09	-	-
07/06/2016	Segundo mes	T1	0.08	0.02	60.0%	66.7%
		T2	0.04	0.009	8.6%	45.6%
		T3	0.02	0.008	8.6%	24.4%
		T4	0.01	0.009	5.7%	12.2%
		Blanco	0.1	0.07	85.7%	22.2%
07/07/2016	Tercer mes	T1	0.08	0.01	0%	11.1%
		T2	0.04	0.009	0%	0%
		T3	0.01	0.008	1.4%	0%
		T4	0.01	0.009	0%	0%
		Blanco	0.1	0.07	-	-

Fuente: Esta investigación.

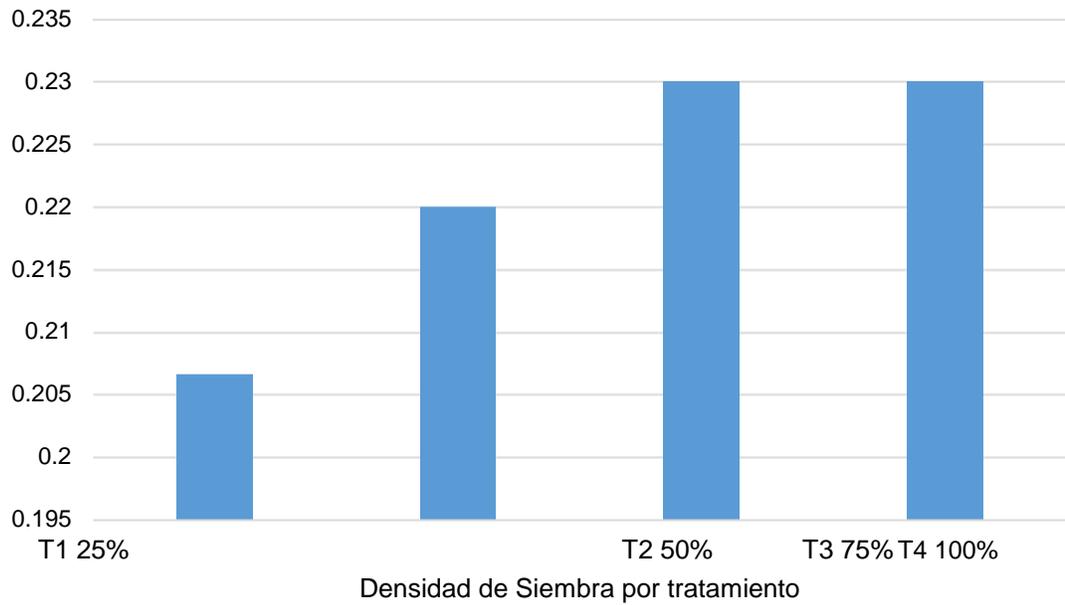


Figura.27. Reducción en la concentración de Mercurio (mg/mes) en los tratamientos experimentales. ; **Fuente:** Esta investigación.

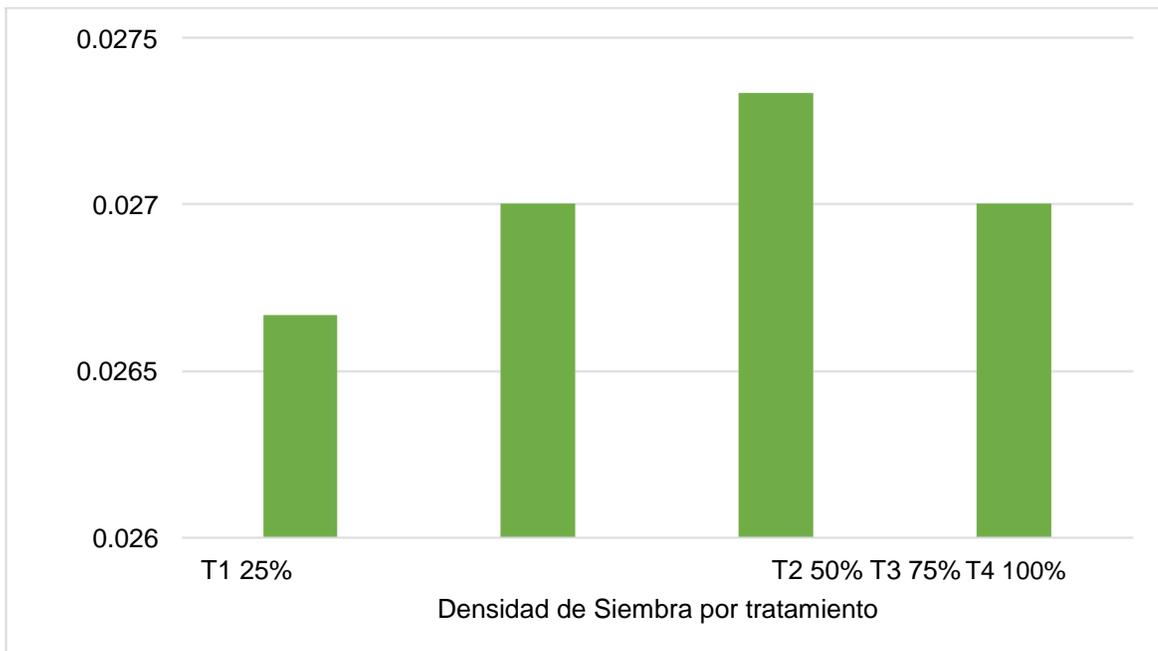


Figura 28. Reducción en la concentración de Cadmio (mg/mes) en los tratamientos experimentales. ; **Fuente:** Esta investigación.

Al analizar el porcentaje de reducción en la concentración de estos metales mes a mes, es posible observar con más detalle las diferencias entre los tratamientos (Tablas 12 y 13). Durante el primer mes, los tratamientos 2,3 y 4 registraron los mayores porcentajes de reducción en la concentración de Mercurio, comprendidos entre el 85 y el 93%, mientras el tratamiento 1 mostró un mayor porcentaje de reducción en el segundo mes (60%). En el tercer mes, los tratamientos 1,2 y 4 no presentaron reducción en la concentración del metal, mientras el tratamiento 3 presentó una reducción del 1,4%.

Para el caso del Cadmio también fue posible evidenciar diferencias en el porcentaje de reducción mes a mes (Tablas 12 y 13), En el primer mes, al igual que para el caso del Mercurio, se destacan los tratamientos 2,3 y 4, con un mayor énfasis en los tratamientos 3 y 4 que presentaron un porcentaje de disminución de 67% y 78%, relación que cambió en el segundo mes, donde el tratamiento 1 se mostró con mayor porcentaje de disminución de Cd (67%) en comparación con el tratamiento 4 que empezó a mostrar menos reducción (12%). Ya en el tercer mes los tratamientos 2,3 y 4 no presentaron disminución de cadmio, solo se evidenció en el tratamiento 1, con un porcentaje de 11,1%.

La reducción en la concentración promedio fue mayor en el primer mes para los dos metales; sin embargo la reducción en cada uno de los tratamientos presentó mayores diferencias respecto al promedio en el caso del Cadmio, según lo indica el coeficiente de variación calculado (58,8%). Posteriormente los siguientes dos meses presentaron menor tasa promedio de reducción y el coeficiente de variación muestra porcentajes muy elevados, esto se debe al ingreso de agua en los tratamientos que alteró las concentraciones de los dos metales, diluyéndolos y alterando los tratamientos.

Tabla 13. Tasa de reducción de metales respecto al tiempo.

	Tiempo	Hg	Cd
		mg/L /mes	mg/L /mes
L e s	T1	0.2	0.01
	T2	0.6	0.04
	T3	0.62	0.06
	T4	0.65	0.07
Tasa de reducción promedio		0.52	0.05
Desviación Estándar		0,212661703	0,026457513
Coeficiente de Variación		41,09404892	58,79447358
S e s	T1	0.42	0.06
	T2	0.06	0.041
	T3	0.06	0.022
Tasa de reducción promedio		0.15	0.03
Desviación Estándar		0,183575598	0,021579311
Coeficiente de Variación		126,6038603	64,41585397
L e s	T1	0	0.01
	T2	0	0
	T3	0.01	0
	T4	0	0
Tasa de reducción promedio		0.003	0.003
Desviación Estándar		0,005	0,005
Coeficiente de Variación		200	200

Fuente: Esta investigación.

Los resultados obtenidos en el estudio de Rodríguez, Cumana, Torrealba y Posada¹⁰¹ muestra una disminución en el mejor de los tratamientos (pasto vetiver + lodo contaminado) desde 21000 ppm de Cr a 13529 ppm de Cr en 15 días, mientras que en el presente estudio muestra que las tasas de disminución de las concentraciones de Hg y Cd que son mucho menores. Pero cabe resaltar que un metal como el Cr puede ser considerado un oligoelemento, que puede servir como nutriente en pequeñas concentraciones, y aunque en este caso era elevada la

¹⁰¹Torres Rodríguez, D., Cumana, A., Torrealba, O., & Posada, D. Uso de vetiver para la fitorremediación de cromo en los lodos residuales de una tenería. Revista mexicana de ciencias agropecuarias. Pág. 1, 179. 2010.

concentración, es diferente el efecto toxico de un metal pesado como el Hg o el Cd¹⁰².

9.6 Densidad de siembra.

9.6.1 Variación de la concentración de Cd en los cuatro tratamientos durante los tres meses.

En la Figura 25 se muestra como la concentración de Cd fue disminuyendo durante los tres meses del experimento. El resultado del análisis ANCOVA para el Cd muestra que hay diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en la concentración de Cd entre las diferentes densidades de siembra, por lo cual se realizaron pruebas pareadas a posteriori usando el test LSD Fisher para un alfa de 0,05. Los resultados (Tabla 14) muestran que existen diferencias significativas en la concentración de Cadmio en el tratamiento 1 (densidad 25%) con respecto a los demás tratamientos, y tiene la concentración promedio más alta del metal (0.03). Las concentraciones de Cadmio difieren significativamente entre el mes 1 y los demás, presentando la mayor concentración promedio (0.05). En cuanto a las covariables, la reducción de Cadmio fue explicada por la conductividad ($p < 0.05$) (Tabla 15).

Tabla 14. Test: LSD Fisher para Cd, respecto a la densidad.

Densidad	Medias	n	E. E			
100	0.01	3	0.01	A		
75	0.02	3	4.1E-03	A		
50	0.02	3	4.3E-03	A	B	
25	0.03	3	4.3E-03		B	
0	0.08	3	0.01			C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Alfa=0.05 DMS=0.01434

Error: 0.0000 gl: 5

Fuente: INFOSTAT (versión libre).

¹⁰² García, I., & Dorrnsoro, C. Departamento edafológico y química agrícola. Obtenido de Contaminación por metales pesados. En tecnología de suelos. 2005.

Tabla 15. Test: LSD Fisher para Cd, respecto al mes.

Mes	Medias	n	E. E			
3	0.02	5	3.5E-03	A		
2	0.03	5	4.7E-03	A		
1	0.05	5	3.8E-03		B	

Alfa=0.05 DMS=0.01111

Error: 0.0000 gl: 5

Fuente: INFOSTAT (versión libre).

Para analizar de mejor manera el desempeño de los tratamientos, es necesario tener en cuenta la relación entre densidad de siembra y tiempo de exposición, debido a que todos los tratamientos llegaron a reducir la concentración de Cd hasta casi el mismo punto, por lo cual se estos resultados deben ser analizados en términos de eficacia. En este contexto el T2, T3 y T4 lograron disminuir la concentración hasta el máximo punto en solo dos meses, pero el T1 con menos cantidad de plantas logra el mismo resultado en 3 meses

9.6.2 Variación de la concentración de Hg en los cuatro tratamientos durante los tres meses.

En la figura 26 se muestra como la concentración de Hg fue disminuyendo durante los tres meses del experimento. El resultado del análisis ANCOVA para el Hg muestra que no hay diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) en la concentración de Hg entre las diferentes densidades de siembra, ni entre los meses de muestreo. Sin embargo, dado que los valores de p fueron cercanos a 0,05, se realizaron pruebas pareadas *a posteriori* usando el test LSD Fisher para un alfa de 0,05. Los resultados (Tabla 17) muestran que existen diferencias significativas en la concentración de mercurio en el tratamiento 1 (densidad 25%) respecto a los demás tratamientos, y tiene la concentración promedio más alta del metal (0,20). Las concentraciones de mercurio difieren significativamente entre el mes 1 y los demás (Tabla 18), presentando la mayor concentración promedio

(0,34). Para el caso del Hg, las covariables no mostraron tener relación con el proceso de disminución de este metal.

Tabla 16. Test: LSD Fisher para Hg, respecto a la densidad.

Densidad	Medias	N	E. E			
100	-0.09	3	0.10	A		
75	0.01	3	0.09	A		
50	0.07	3	0.08	A		
25	0.20	3	0.09	A	B	
0	0.45	3	0.13		B	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Alfa=0.05 DMS=0.29631

Error: 0.0199 gl: 5

Fuente: INFOSTAT (versión libre).

Tabla 17. Test: LSD Fisher para Hg, respecto al mes.

Mes	Medias	n	E. E			
3	0.01	5	0.10	A		
2	0.03	5	0.07	A		
1	0.034	5	0.08		B	

Alfa=0.05 DMS=0.01111

Error: 0.0199 gl: 5

Fuente: INFOSTAT (versión libre).

Hablando en términos de densidad, la eficiencia del T2, T3 y T4 es similar, en comparación de T1, donde se logró una menor disminución del metal. Pero se destaca el T2 debido a que posee una densidad de siembra del 50% y logro una eficiencia similar al T3= 75% y T4= 100%. Sin embargo el T4 es quien logra mayor disminución de la concentración de Hg y los resultados arrojados en el segundo y tercer mes, muestran una igualdad en la concentración encontrada en este tratamiento (0,01 mg/L), dando indicios para suponer un posible límite de detección.

9.7 Relación entre reducción en la concentración de los metales y las covariables.

9.7.1 Mediciones Conductividad

En la figura 29, se presenta la variación de la conductividad que se obtuvo durante los tres meses de la investigación. Los tratamientos T1, T2, T3, y T4, presenta una similitud en el segundo mes con un rango de 633 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 553 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Generalmente la conductividad se define como la medida de la facilidad con que la corriente eléctrica pasa a través del agua¹⁰⁵, y está estrechamente relacionada con la presencia de sales disueltas que se componen de iones metálicos y compuestos no metálicos. Al primer mes de muestreo, la conductividad se comporta conforme a lo esperado en los tratamientos T2, T3 y T4, (a medida que disminuye la concentración de metales, disminuye la conductividad), sin embargo el T1 presenta un comportamiento distinto en la conductividad, mostrando un aumento significativo. Esta eventualidad se le atribuye a la aparición de algas en el T1 en sus tres repeticiones, que probablemente se deba a que este tratamiento poseía la menor densidad de plántulas de vetiver, por lo cual fueron propicias las condiciones de luminosidad en el agua y disponibilidad de alimento. La presencia de algas aumentaron la cantidad de materia orgánica presente en los T1, la cual según Simón, M.; Peralta, N. & Costa, L., posee componentes que aumentan la conductividad¹⁰⁶. Después del primer mes, el alga fue desapareciendo hasta su inexistencia.

La conductividad durante los tres meses se encuentra en un rango de 360 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 933 $\mu\text{S}/\text{cm}$, este resultado prueba que el pasto vetiver es capaz de tolera estas altas concentración de conductividad eléctrica, como lo afirma Troung, P.¹⁰⁷.

¹⁰⁵ Universidad de Salamanca. Aguas Residuales. Curso a distancia de potabilizadoras. S.f

¹⁰⁶ Simón, M.; Peralta, N. & Costa, L.. Relaciones entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. Asociación Argentina Ciencia del Suelo (AACS).2013.

¹⁰⁷ Troung, P. Obtenido de La tecnología del pasto vetiver para la protección ambiental. (S.f).

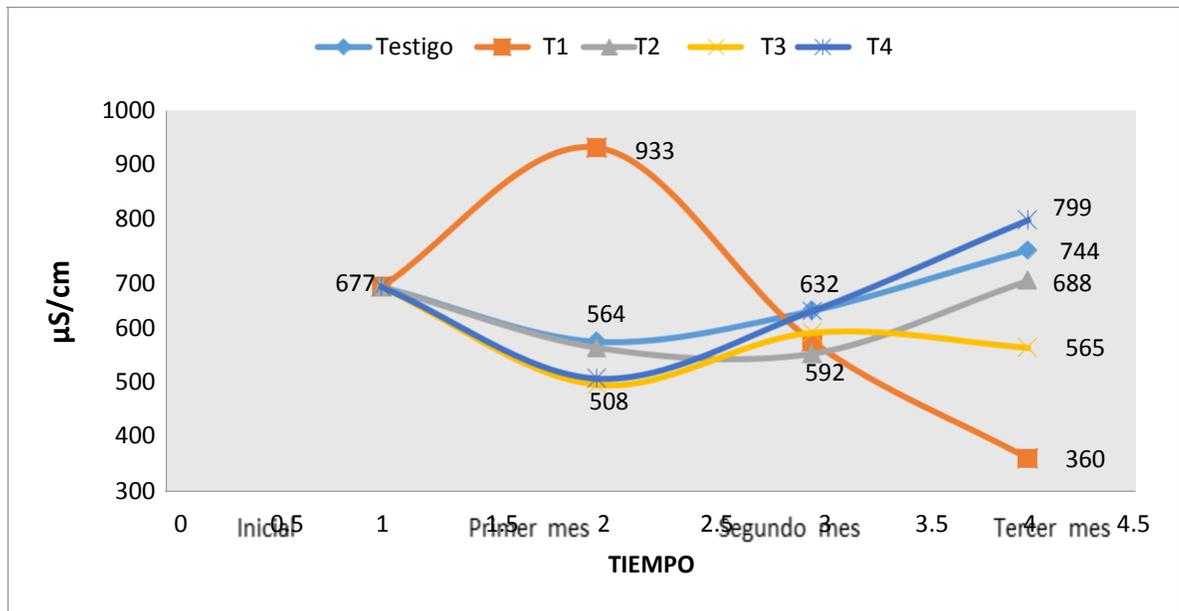


Figura 29. Registro de la conductividad durante los tres meses de la investigación. ; **Fuente:** Esta investigación.

9.7.2 Mediciones de Temperatura

En la figura 30 se registraron los datos de temperatura en el agua de las muestras que fueron enviadas al laboratorio, para el análisis de los metales. Esta medición se incluyó en esta investigación debido a que la temperatura determina la disponibilidad de iones metálicos, según lo afirma Hooda¹⁰⁸. También es una variable sumamente importante en procesos biológicos ya que ésta influye en la velocidad del metabolismo.

Según Rodríguez, I. (2005)¹⁰⁹ la temperatura no influye de forma significativamente en la capacidad de absorción, dato que se evidencia en esta investigación mediante el análisis de covarianza, ya que en este, la covariable Temperatura no explica la disminución de los metales ($p=0.4224$). Sin embargo en

¹⁰⁸ Hooda, P. A. Effects of time and temperature on the bioavailability of Cd and Pb from sludge- amended soils. Journal of Soils Science, Pag. 97.1993.

¹⁰⁹ Rodríguez, I. Obtenido en Adsorption of mercury(II) from aqueous solution on natural and oxidized corncob. Separation and Purification Technology. 2015.

la figura 30 se muestra un comportamiento dinámico, lo cual puede ser explicado por las variaciones de la temperatura ambiental de la zona¹¹⁰.

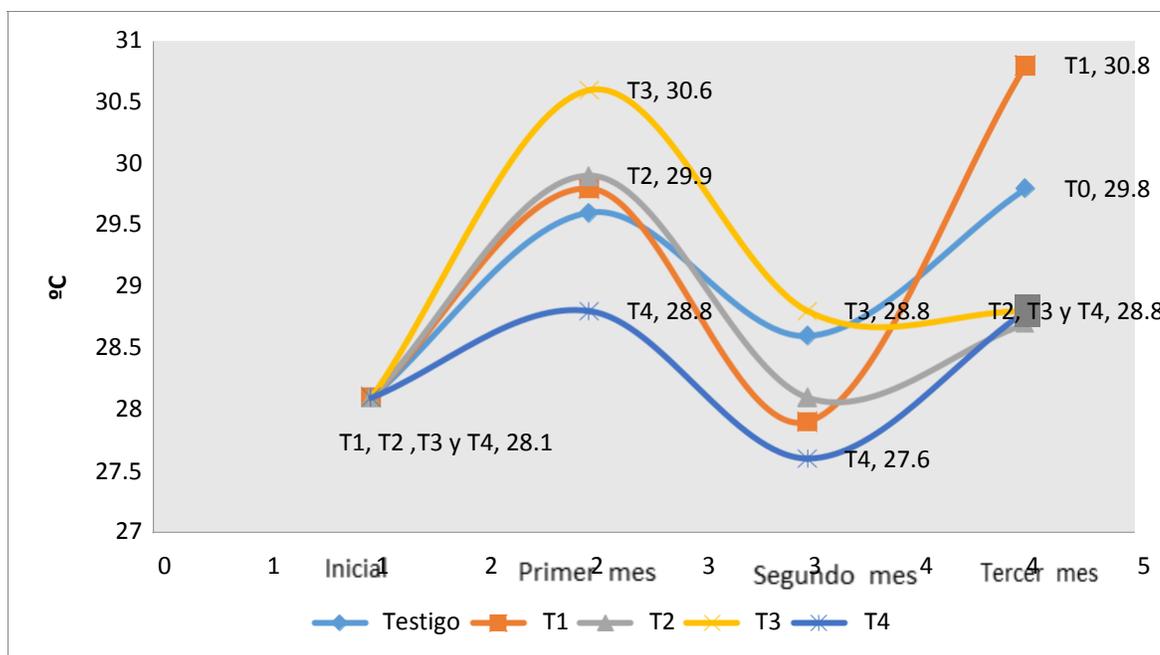


Figura 30. Comportamiento de la temperatura en los tres meses de la investigación. ; **Fuente:** Esta investigación.

9.73. Mediciones de pH

En la presente investigación se registró un pH inicial de 7.97, valor que en términos de pH tiende a ser básico. Según Higuera et al.¹¹¹ los valores de pH más elevados están relacionados con mayores concentraciones de metales. No obstante en los resultados obtenidos del ANCOVA, la covariable pH no mostro ser significativa en la disminución de Hg y Cd ($p= 0.1965$).

A pesar de no explicar el fenómeno, en la figura 31 se muestra que durante el proceso en los tres meses, si se evidencio una disminución del pH en el T1, T2, T3 y T4. Conforme los resultados del ANCOVA en cuanto al pH, se puede asumir la

¹¹⁰ Meteoblue. Archivo meteorológico de Tocaima. Fuente. 2016.

¹¹¹Higuera et al Consultado en López Tejedor. M. Informes Técnicos Ciemat. Obtenido de Estudio de la Absorción y Distribución del Mercurio en Nerium Oleander L. en la Ribera del Río Valdeazogues (Estación de Chillón - Almadén). 1995.

disminución por efecto de los ácidos orgánicos exudados constantemente por las raíces de las plantas¹¹².

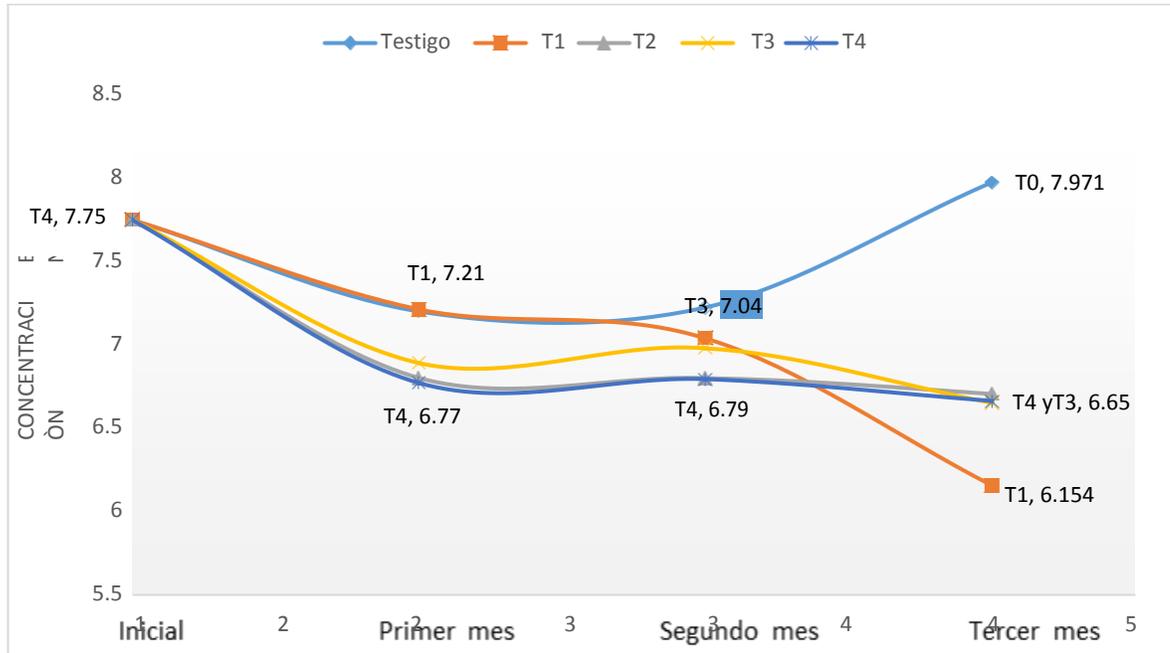


Figura 31. Comportamiento del pH durante los tres meses de la investigación. ; **Fuente:** Esta investigación.

¹¹² Krishnamurti, G., Ceslinski, G., Huang, P. M., & Van Rees, K. kinetics of cadmium release from soils as influenced by organic acids: implication in cadmium availability. Journal of Environmental Quality. Pag. 271-277. 1997.

10 Conclusiones

El pasto vetiver demostró tener buen desarrollo vegetativo, con hojas rígidas y coloración verde oscura, en el proceso hidropónico con el agua colectada del canal de riego proveniente de la cuenca baja del río Bogotá. Presentado solamente en las primeras semanas respuestas de toxicidad, que se evidenciaron con tonalidad rojiza en sus hojas, mostrando la posible absorción de mercurio, cadmio y otros metales que estarían presentes en el agua.

Los resultados obtenidos de la tasa probable de disminución en el primer mes, demuestran que posiblemente el pasto vetiver realizó una disminución en la concentración de Mercurio de 0.7 mg/L a 0.52 mg/L; y una disminución en la concentración de Cadmio de 0.09 mg/L a 0.05 mg/L, siendo estos los datos promedio de los cuatro tratamientos. No obstante, no fue posible establecer una tasa de disminución específica para los dos meses siguientes por causa de una ruptura en el plástico que protegía los tratamientos del agua lluvia.

Respecto a las densidades de siembra se establece que el tratamiento que consiguió mayor disminución de las concentraciones de mercurio y cadmio, en los dos primeros meses, fue el T4, que al tener mayor cantidad de plántulas pudo haber absorbido más mercurio y cadmio. Pero al mes tercero los tratamientos disminuyeron su posible capacidad de absorción asemejándose su comportamiento a una estabilización. Esto se debe al ingreso de agua lluvia en el segundo mes, que diluyó la concentración de los metales presentes en los tratamientos, hasta el punto no sufrir disminuciones considerables en las concentraciones de los metales, desde el segundo mes hasta el tercero.

La conductividad, presenta una relación con la absorción de cadmio, debido a que el cadmio es un elemento de naturaleza química muy similar al zinc, el cual es un micronutriente para las plantas, esencial para la transformación de los hidratos de carbono, por este motivo la planta tiende a confundir el cadmio con el zinc, absorbiendo de una manera mas fácil las sales de cadmio debido a que es

transportado al interior de la planta por diferentes proteínas transportadoras de cationes como: Ca^{+2} , Zn^{+2} , Fe^{+2} , Mg^{+2} , Mn^{+2} , Pb^{+2} , Cu^{+2} y Ni^{+2} . El cadmio presenta semejanzas con muchos elementos esenciales para las plantas¹²⁸.

Las plantas de vetiver fueron donadas al semillero de investigación de la universidad de Cundinamarca, seccional Fusagasugá: grupo de investigación Agricultura Orgánica y Salud del Suelo (AOSS), a cargo del docente Juan Carlos Tapias Duarte, que utilizara esta biomasa para investigar la distribución de los metales en esta especie.

¹²⁸ Coon S, Gilliam M; Comparative physiology of elemental distribution in plants. *Annals of Botany* 105: 1081-1102.

2010. Citado en: Sagardoy Calderón, R. Estudio de la homeostasis de Zn y Cd en plantas superiores. 2011.

11 Recomendaciones

Este trabajo investigativo buscó determinar la eficiencia del pasto vetiver para la remoción de Hg y Cd en agua, pero por motivos de límites económicos no fue posible realizar los análisis bromatológicos en el área foliar y radicular en los tratamientos, donde se demostraría que la disminución en la concentración de Hg y Cd, que se evidenció en este proyecto investigativo, fue causada por acción del pasto.

Por este motivo se recomienda a futuros investigadores que retomen este tema o que requieran la información de esta investigación; que se debe realizar el análisis de metales en la biomasa, para poder asegurar con certeza que la concentración disminuida o parte de ella, se encuentra en la biomasa del pasto vetiver y así, obtener resultados que se puedan denominar como fitorremediación.

Aunque si se hace hasta este punto, se obtendrá un resultado de la fitorremediación que ocurriría específicamente para el caso de la muestra de agua usada en el proceso, sin tener en cuenta todas las condiciones no controladas que pueden interferir, disminuyendo u optimizando la capacidad del pasto vetiver para realizar la fitorremediación.

Es por esto que para determinar la tasa de absorción del vetiver, se hará necesario realizar este proceso en fase de laboratorio, con agua esterilizada y desionizada, en la cual mediante diluciones de las respectivas sales metálicas, se obtendrán concentraciones de los metales conocidas y partiendo de esto, se podrá obtener la tasa de absorción real: la capacidad del pasto vetiver para la absorción de estos metales en condiciones ideales.

En el caso de que se quiera investigar este tema más afondo, es recomendable que se analice de mejor manera la relación que existe entre la absorción del Cadmio con la conductividad, debido a que en la presente investigación, a la hora de evaluar la influencia de cada una de las covariables en el proceso de absorción de los metales, solo fue significativa para el caso de la conductividad en la

absorción del cadmio. Posiblemente si se somete el proceso a diferentes valores de conductividad, y se analice la variación en la concentración del Cadmio, se pueda hallar un intervalo óptimo para la absorción de este metal.

Al finalizar este proceso con el pasto vetiver, la planta deberá quedar con una concentración de metales en su biomasa, problema que ha acarreado la fitorremediación hasta el día de hoy. Se recomienda realizar estudios de viabilidad del aprovechamiento y/o disposición final adecuada para estos residuos con metales pesados, que indaguen en el uso de estos para artesanías o mezclas con cemento para construcciones.

Es bueno aclarar que con los resultados obtenidos, aun no es posible determinar la eficiencia de un sistema con pasto vetiver para tratar un vertimiento puntual, con puesto que harían falta estudios para calcular a precisión el comportamiento del vetiver en la absorción de metales a caudales determinados, y el efecto que puede acarrear un gran volumen de biomasa en el proceso de fitorremediación, mediante factores como la competencia y desarrollo en general, puesto que los procesos biológicos no son predecibles al ser llevados a escalas de gran diferencia.

12 Anexos

INFORME N°12-MI16 (15011) 2016-04-20

	VINCULACIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA	Código: VC_F_116
	Reporte de Resultados Laboratorio de Servicios para varias Muestras	Versión: 2
		Fecha de vigencia: (01-02-2016)

1. Información del cliente

Nombre y Apellido: JUAN PABLO CORRECHA BRÍNEZ
 Cédula o NIT:
 Dirección:
 Dpto: CUNDINAMARCA
 Municipio: TOCAIMA
 Tel. fijo/Celular:
 Análisis solicitado: MERCURIO Y CADMIO


 Número de solicitud
12

2. Información de la muestra

Matriz: AGUA
 Presentación: LIQUIDO
 Finca: NO INDICA
 Fecha de muestreo: 2016-04-04
 Fecha de recepción: 2016-04-04
 Fecha(s) de análisis: 2016-04-05
 Fecha de reporte: 2016-04-19

DETERMINACIÓN ANALÍTICA			
Codigo de laboratorio	UNIDADES MÉTODOS IDENTIFICACIÓN	MERCURIO (Hg)	CADMIO (Cd)
		Mg/l	Mg/l
		AOAC 2003.01	
AM16-15011	MERCURIO	0,7	
	CADMIO	0,09	

Observaciones:

*Los resultados son válidos únicamente para la muestra en referencia
 Este documento ha sido producido electrónicamente y es válido sin la firma.
 Este documento no puede ser reproducido total ni parcialmente, sin la autorización formal de CORPOICA*

CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA, NIT: 800194600-3
 CENTRO DE INVESTIGACIÓN TIBAITATA
 KILOMETRO 14 VÍA MOSQUERA (CUNDINAMARCA)
 TELÉFONOS: 4227300 EXT: 1414
 E-MAIL: ypaeZo@corpoica.org.co

FIN DEL INFORME

Anexo 1. Análisis de laboratorio Inicial. ; Fuente: Laboratorio CORPOICA, 2016

INFORME N° 6-MI16 (15011)

	VINCULACIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA	Código: VC_F_116
	Reporte de Resultados Laboratorio de Servicios para varias Muestras	Versión: 2 Fecha de vigencia: (01-02-2016)
LABORATORIO DE MICROBIOLOGÍA		
1. Información del cliente		
Nombre y Apellido:	DANIEL CUBILLOS	
Cédula o NIT	11366512	
Dirección:		
Dpto.	CUNDINAMARCA	
Municipio:	TOCAIMA	
Tel. fijo/Celular:	3214295583	
Análisis solicitado:	METALES PESADOS	
2. Información de la muestra		
Matriz:	AGUA	Número de solicitud 25 <i>Lider Unidad de Laboratorio</i>
Presentación	LIQUIDO	
Finca:	NO INDICA	
Fecha de muestreo:		
Fecha de recepción:		
Fecha(s) de análisis:		
Fecha de reporte:		
DETERMINACIÓN ANALÍTICA		
Código de laboratorio		
	UNIDADES MÉTODOS IDENTIFICACIÓN	RESULTADO
		mg/l Hg Cd mg/l Hg Cd
		AOAC 2003.01 AOAC
AM16-15011	TRATAMIENTO	
	T1	Hg 0.5 Cd 0.08
	T2	Hg 0.1 Cd 0.05
	T3	Hg 0.08 Cd 0.03
	T4	Hg 0.05 Cd 0.02
Observaciones:		
<p>Los resultados son validos unicamente para la muestra en referencia Este documento ha sido producido electrónicamente y es válido sin la firma. Este documento no puede ser reproducido total ni parcialmente, sin la autorizacion formal de CORPOICA</p> <p style="text-align: center;"> CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA, NIT: 800194600-3 CENTRO DE INVESTIGACIÓN TIBAITATA KILOMETRO 14 VÍA MOSQUERA (CUNDINAMARCA) TELÉFONOS: 4227300 EXT: 1414 E-MAIL: ypaeZc@corpoica.org.co </p>		

FIN DEL INFORME

Anexo 2. Análisis de laboratorio primer mes. ; Fuente: CORPOICA, 2016

INFORME N° 22-A16 (15127) Daniel Cubillos 2016-06-30

	VINCULACIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA		Código: VC_F_116
			Versión: 2
Reporte de Resultados Laboratorio de Servicios para varias Muestras		Fecha de vigencia: (01-02-2016)	
LABORATORIO DE QUÍMICA DE SUELOS, AGUAS Y PLANTAS			
1. Información del cliente			
Nombre y Apellido:	DANIEL CUBILLOS	 Número de solicitud 22	
Cédula o NIT	11366512		
Dirección:	CALLE 7 # 2-05 INT 6 CASA 3		
Dpto:	CUNDINAMARCA		
Municipio:	TOCAIMA		
Tel. fijo/Celular:	8207359		
Tipo de análisis:	METALES PESADOS		
2. Información de la muestra			
Finca:			
Matriz:	AGUA		
Tipo de agua:	NO INDICA		
Tipo de riego:			
Fecha de recepción:	2016-06-07	Jamer Ricardo Jiménez. (7882) Líder Unidad de Laboratorio de suelos	
Fecha de reporte:	2016-06-30		
DETERMINACIÓN ANALÍTICA			
CÓDIGO LABORATORIO	UNIDADES	Hg Cd	
	MÉTODOS	SM3120 B Modificado	
IDENTIFICACION		VALORES	
TREATAMIENTO	RESULTADO		
	Hg	Cd	
T1	0.08	0.02	
T2	0.04	0.009	
T3	0.02	0.008	
T4	0.01	0.009	
OBSERVACIONES:			

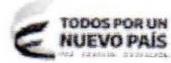
Los resultados son válidos únicamente para la muestra en referencia
 Este documento ha sido producido electrónicamente y es válido sin la firma.
 Este documento no puede ser reproducido total ni parcialmente, sin la autorización formal de CORPOICA

CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA, NIT: 800194600-3
 CENTRO DE INVESTIGACIÓN TIBAITATA
 KILOMETRO 14 VÍA MOSQUERA (CUNDINAMARCA)
 TELÉFONOS: 4227300, extensión 1414
 E-MAIL: ypaezo@corpoica.org.co

FIN DEL INFORME

Anexo 3. Análisis de laboratorio segundo mes. ; Fuente: CORPOICA, 2016

INFORME N° 22-A16 (15127) Daniel Cubillos 2016-06-30

	VINCULACIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA		Código: VC_F_116														
			Versión: 2														
Reporte de Resultados Laboratorio de Servicios para varias Muestras		Fecha de vigencia: (01-02-2016)															
LABORATORIO DE QUÍMICA DE SUELOS, AGUAS Y PLANTAS																	
1. Información del cliente																	
Nombre y Apellido: DANIEL CUBILLOS Cédula o NIT: 11366512 Dirección: Dpto: CUNDINAMARCA Municipio: Tel. fijo/Celular: 8207358 Tipo de análisis: METALES PESADOS Hg Cd	 		Número de solicitud 74														
2. Información de la muestra																	
Finca: Matriz: AGUA Tipo de agua: NO INDICA Tipo de riego: GOTE	Fecha de recepción: Fecha de reporte:																
			<u>Jamer Ricardo Jiménez. (7882)</u> Líder Unidad de Laboratorio de suelos														
DETERMINACIÓN ANALÍTICA																	
CODIGO LABORATORIO	UNIDADES	Mercurio cadmio															
	METODOS	SM3120 B Modificado															
IDENTIFICACION		VALORES															
<table border="1"> <thead> <tr> <th>TRATAMIENTO</th> <th>Hg</th> <th>Cd</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T1</td> <td>0.08</td> <td>0.01</td> </tr> <tr> <td>T2</td> <td>0.04</td> <td>0.009</td> </tr> <tr> <td>T3</td> <td>0.01</td> <td>0.008</td> </tr> <tr> <td>T4</td> <td>0.01</td> <td>0.009</td> </tr> </tbody> </table>	TRATAMIENTO	Hg	Cd	T1	0.08	0.01	T2	0.04	0.009	T3	0.01	0.008	T4	0.01	0.009		
TRATAMIENTO	Hg	Cd															
T1	0.08	0.01															
T2	0.04	0.009															
T3	0.01	0.008															
T4	0.01	0.009															
OBSERVACIONES:																	

Los resultados son válidos únicamente para la muestras en referencia
 Este documento ha sido producido electrónicamente y es válido sin la firma.
 Este documento no puede ser reproducido total ni parcialmente, sin la autorización formal de CORPOICA

CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA, NIT: 800194600-3
 CENTRO DE INVESTIGACIÓN TIBAITATA
 KILOMETRO 14 VÍA MOSQUERA (CUNDINAMARCA)
 TELÉFONOS: 4227300, extensión 1414
 E-MAIL: ypaezo@corpoica.org.co

FIN DEL INFORME

Anexo 5. Registro de mediciones de covariables.

Tabla 18. Mediciones de covariables.

Registro de mediciones de covariables.						
Covariable	Tiempo	Testigo	T1	T2	T3	T4
Temperatura	04/05/2016	29.6	29.8	29.9	30.6	28.8
	07/06/2016	28.6	27.9	28.1	28.8	27.6
	07/07/2016	29.8	30.8	28.7	28.8	28.8
pH	04/05/2016	7.2	7.21	6.8	6.89	6.77
	07/06/2016	7.22	7.04	6.8	6.98	6.79
	07/07/2016	7.971	6.154	6.705	6.65	6.66
Conductividad	04/05/2016	576	933	564	496	508
	07/06/2016	633	576	553	592	632
	07/07/2016	744	360	688	565	799

Fuente: Autores, 2016

13 Bibliografía

- Atencio Garcia, V., Prado Carrasco, S., Barrera Cruz, A., & Martines Tirado, E. (2006). Efecto de la densidad de siembra en el alevinaje de la dorada (*Brycon sinuensis* Dahl,1955). *Revista Colombiana de ciencias pecuarias*, 19(2), 197.
- Angélica Evelin Delgadillo-López, C. A.-R.-G.-G.-S. (2011). CONTAMINACIÓN, FITORREMEDIACIÓN: UNA ALTERNATIVA PARA ELIMINAR LA CONTAMINACIÓN. México: Tropical and Subtropical Agroecosystems. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n2/v14n2a2.pdf>
- Arce Sandra, A. J. (2013). (Universidad Simón Bolívar) Obtenido de Uso de *Chrysopogon zizanioides* para la fitorremediación de suelos contaminados por As y Hg: http://www.vetiver.org/LAICV2F/2%20Environmental%20Protection/E4Sandra_TS.pdf
- Arroyave, M. I. (Diciembre de 2006). EFECTOS DEL MERCURIO SOBRE ALGUNAS PLANTAS ACUÁTICAS TROPICALES. *EIA(1794-1237)*, 63.
- Broky, M. L. (s.f.). *ESCUELA NORMAL "Juan P. Pringles"*. Obtenido de LABORATORIO: PH: http://server-enjpp.unsl.edu.ar/escuela/images/laboratorio_de_ph.pdf
- ligoo. (s.f.). *Toxiambiental*. Obtenido de Glosario: <http://toxiambiental.bligoo.com.co/glosario#.WAZSnWX0jIU>
- Calderón, J. A., Ramos, O. M., & Barrios, y. E. (1997). *Contaminación del agua, los pastos, la leche y las carnes bovinas por arsénico, mercurio, plomo y cadmio en la planicie aluvial baja del río Bogotá*. . Girardot, Cundinamarca: Produmedios Corveica.
- Castro, F. S. (2016). *Multi Tech Solutions*. Obtenido de Mapa del Río Bogotá: <http://mts-fsc.com/index.php/enlaces/diagnostico-del-rio-bogota/37-mapa-del-rio-bogota>
- Chulim, Á. C., Escobar, H. M., Bernal, E. I., & Crespo, E. C. (2014). Calidad del agua para riego en la Sierra Norte de Puebla, México. *Científica Redalyc "Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal"*, 83.
- Cristina Lomonte, y. W. (2014). *Revista Internacional de fitorremediación* . Obtenido de El estudio de la distribución espacial de Mercurio en las raíces de vetiver (*zizanioides Chrysopogon*) por micro-PIXE Espectrometría: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15226514.2013.821453>
- Danh, P. T. (2015). *EL SISTEMA VETIVER PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA*. Obtenido de SEGUNDA EDICIÓN: PREVENCIÓN Y TRATAMIENTO DE AGUAS Y SUELOS CONTAMINADOS: <http://www.vetiver.org/Water%20quality%20Spanish%20web%202.pdf>

- Danh, P. T. (2015). *EL SISTEMA VETIVER PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA*. Obtenido de PREVENCIÓN Y TRATAMIENTO DE AGUAS Y SUELOS CONTAMINADOS:
<http://www.vetiver.org/Water%20quality%20Spanish%20web%202.pdf>
- Dinero, R. (2014). *Rio bogotá le pasa factura al gobierno*. Obtenido de Fundación al verde vivo:
<http://alverdevivo.org/SitioAntiguo/Documentos/EL%20PROBLEMA%20DEL%20RIO%20OGOTA.pdf>
- Duilio Torres Rodríguez, A. C. (2010). *SCIELO "Revista mexicana de ciencias agrícolas"*. Obtenido de Uso del vetiver para la fitorremediación de cromo en lodos residuales de una tenería:
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342010000200005
- Eskakeados", P. E. (2016). Obtenido de METEOROLOGÍA - TIPOS DE ISOLÍNEAS Y FUNCIÓN QUE DESARROLLAN CADA UNA:
http://www.loseskakeados.com/joomla1cinco/index.php?option=com_content&view=article&id=7868:meteorologa-tipos-de-isolneas-y-funcin-que-desarrollan-cada-una-&catid=347:meteorologa&Itemid=298
- El Ministerio de Educación, C. y. (s.f.). *La nutrición de las plantas*. Obtenido de Absorción de agua y sales por la raíz:
http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/2esobiologia/2quincena7/2quincena6_c ontenidos_3a.htm
- Flores, S. E. (s.f.). *APÉNDICE A*. Obtenido de PRUEBA DE NORMALIDAD DE SHAPIRO-WILK:
http://webdelprofesor.ula.ve/ciencias/segninis/Docencia/ANEXO_A_Sahapiro-Wilks.pdf
- García, I., & Dorronsoro, C. (2005). *Departamento edafológico y química agrícola*. Obtenido de Contaminación por metales pesados. En tecnología de suelos:
<http://edafologia.ugr.es/index.htm>
- Glosarios de términos especializados. (2011). *Términos estadísticos*. Obtenido de Covariables:
<http://glosarios.servidor-alicante.com/terminos-estadistica/covariables>
- Gimenez, J. B. (2015). CULTIVO EN HIDROPONÍA. En *Introducción al cultivo hidropónico* (pág. 10). Universidad Nacional de La Plata. Obtenido de
http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/46752/Documento_completo.pdf?sequence=1
- Gómez, A. M. (Febrero de 2005). <http://www.bdigital.unal.edu.co>. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/1125/1/angelicamariajimenezgomez.2005.pdf>
- Hooda, P. A. (1993). Effects of time and temperature on the bioavailability of Cd and Pb from sludge- amended soils. *Journal of Soils Science*, 97.
- Hernández, L. J. (14 de Febrero de 2014). Agencia de Noticias de la Universidad Nacional. *Nueve de cada 10 bogotanos tienen mercurio y plomo en su organismo*. Bogotá, Colombia: El Espectador.

- Hypergeo. (2014). Obtenido de Homogeneidad: <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article135>
- Infojardin. (2002-2016). *Absorción de nutrientes*. Obtenido de <http://www.infojardin.net/glosario/abonos-binarios/absorcion-de-nutrientes.htm>
- J. Pérez Carballo, E. V. (2013). En *Introducción a la gestión financiera de la empresa* (pág. 164). Madrid: Graficas DO-MO. Obtenido de https://books.google.com.co/books?id=O6n8huDgvi4C&pg=PA164&lpg=PA164&dq=que+significa+disminuir&source=bl&ots=bFqZPXcl2v&sig=5vsQ_QwjsAO4eKlgX2wDXDceYIQ&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=que%20significa%20disminuir&f=false
- Krishnamurti, G., Ceslinski, G., Huang, P. M., & Van Rees, K. (1997). kinetics of cadmium release from soils as influenced by organic acids: implication in cadmium availability. *Journal of Enviromental Quality*, 271-277.
- Marques , A., Senior, W., & Martinez, G. (Septiembre de 2000). *Concentraciones y comportamientos de metales pesados en una zona estuarina de venezuela*, 25, 6, 290. (Interciencia, Ed.) Venezuela.
- Mayagüez, U. d. (s.f.). *Manual parte 2*. Obtenido de PARAMETROS FISICO-QUIMICOS: TEMPERATURA: <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-temperatura.pdf>
- Mayagüez, U. d. (s.f.). *Manual parte 2*. Obtenido de PARAMETROS FISICO-QUIMICOS: SALINIDAD : <http://www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-salinidad.pdf>
- Mendez Cardenas, L. I. (2014). *ALTERNATIVAS DE ABASTECIMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO CALANDAIMA EN CUNDINAMARCA-COLOMBIA*. Bogotá, DC, Colombia.
- Minitab 17. (2016). Obtenido de Método de la diferencia significativa mínima de Fisher (LSD) : <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/anova/multiple-comparisons/what-is-fisher-s-isd-method/>
- Mónica Scavo, O. R. (s.f.). *ESTUDIO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES COMPLEMENTARIO, CON PASTO VETIVER (VETIVERIA ZIZANIOIDES L.), PROVENIENTES DE UNA PLANTADE PRODUCCIÓN DE GASEOSAS, EN VILLA DE CURA, ESTADO ARAGUA*". Obtenido de Universidad Central de Venezuela.: <http://www.vetiver.com/ICV4pdfs/BA17es.pdf>
- Navarra, G. d. (02 de Marzo de 2012). *Meteorología y climatología de Navarra*. Obtenido de Evaporímetro: <http://meteo.navarra.es/definiciones/evaporimetro.cfm>
- Noguera, N. G. (2005). *Bioteconología ambiental y Bioteconología vegetal*. Obtenido de BIOTECNOLOGÍA: <http://www.portaley.com/bioteconologia/bio3.shtml>
- Preciado, A. (31 de Julio de 2012). *Fundación al verde Vivo*. Obtenido de <http://alverdevivo.org/SitioAntiguo/Documentos/EL%20PROBLEMA%20DEL%20RIO%20BOGOTA.pdf>

- Quiñones, R. T. (2011). *Universidad Nacional*. Obtenido de Prueba de normalidad: <https://es.scribd.com/doc/94621641/Prueba-de-Normalidad-Estadistica>
- Rafael Esteban Ortega-Ortega, J. D.-H.-N. (23 de Mayo de 2011). *Revista Colombiana de Biotecnología*. Obtenido de Acumulación de mercurio (Hg) por caña flecha (*Gynerium sagittatum*) (Aubl) Beauv. in vitro: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/22923/38225>
- Ramos, E. (11 de 08 de 2014). *El espectador*. Obtenido de ¿CUÁLES SON LOS MUNICIPIOS QUE CONTAMINAN EL RÍO BOGOTÁ?: <http://blogs.elespectador.com/el-rio/2014/08/11/cuales-son-los-municipios-que-contaminan-el-rio-bogota/>
- red, T. d. (s.f.). *Estudio de la contaminación por metales pesados de la cuenca Llobregat*. Obtenido de Metales pesados y componentes mayoritarios en aguas: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6978/04ComponentesAguas01.pdf;jsessionid=C0FB0FC1689A17A176D180F26366CB26?sequence=4>
- Regine Brandt, R. S.-K. (s.f.). *University of Münster, Institute of Landscape Ecology, Germany*. Obtenido de Potential of Vetiver (*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash) for phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils in Venezuela: <http://www.vetiver.com/ICV4pdfs/BA22.pdf>
- Ruiz, C., Luque, O., Rodriguez, O., & Alarcon, N. (S.f). *Desarrollo de un sistema de tratamiento para la remosion de Fluor del agua mediante el uso de Vetiveria zizanioides en Guarataro, Yaracuj, Venezuela*. Venezuela.
- Sagan, L. M. (s.f.). *El proceso de nutrición de las plantas*. Obtenido de <http://assets.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448180895.pdf>
- Sanchez, S., & Murillo, O. (13 de 07 de 2004). *Desarrollo de un método para controlar la calidad de producción de plántulas en viveros forestales: estudio de caso con ciprés*. Obtenido de www.mag.go.cr/rev_agr/v28n02_095.pdf
- SCORP. (2006). Obtenido de Análisis de Covarianza : <http://www.uru.edu/fondoeditorial/libros/pdf/manualdestatistix/cap6.pdf>
- Serrano, L. B. (2010). *Ambiente ecologico*. Obtenido de Contaminación por Mercurio y sus consecuencias e impactos en la ecología y Población Rural: http://www.ambiente-ecologico.com/ediciones/2002/085_09.2002/085_Investigacion_LuisBarretoSerrano.php3
- Troung, P. (S.f). Obtenido de La tecnolgia del pasto vetiver para la proteccion ambiental: http://www.vetiver.org/LAVN_Prot%20Amb.htm
- Universidad de Tarapacá. (2012). *ANÁLISIS ESTADÍSTICO UNIVARIADO, BIVARIADO Y VARIABLES CONTROL*. Obtenido de <http://chitita.uta.cl/cursos/2012-1/0000104/recursos/r-25.pdf>