

EFICIENCIA DE LA FITORREMEDIACIÓN CON *Brachiaria decumbens* PARA SUELOS
CONTAMINADOS CON ARSÉNICO POR ACTIVIDADES AGRICOLAS

PRESENTADO POR

CRISTIAN CAMILO ROA ROJAS
MÓNICA ELOISA CRISTANCHO PÉREZ

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE TECNOLOGO EN
DESARROLLO AMBIENTAL

ESCUELA COLOMBIANA DE CARRERAS INDUSTRIALES

FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL

BOGOTÁ D.C.

2014

EFICIENCIA DE LA FITORREMEDIACIÓN CON *Brachiaria decumbens* PARA SUELOS
CONTAMINADOS CON ARSÉNICO POR ACTIVIDADES AGRICOLAS

PRESENTADO POR

CRISTIAN CAMILO ROA ROJAS
MÓNICA ELOISA CRISTANCHO PÉREZ

DIRECTOR

RAFAEL ERNESTO VALERO VARGAS

MVZ, Esp. Gestión Ambiental

ESCUELA COLOMBIANA DE CARRERAS INDUSTRIALES

FACULTAD DE INGENIERIA

BOGOTÁ D.C.

2014

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C. Mayo de 2014

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias que nos apoyan diariamente desde cerca o desde lejos, porque gracias a ellas se han logrado los objetivos propuestos hasta hoy.

A los docentes que nos han enseñado y apoyado con los conceptos de profesionales y nos hacen diariamente amar más nuestra carrera.

A nuestro director de tesis, que nos ha transmitido conceptos para ir formando una serie de definiciones y lograr la presentación del proyecto, por el apoyo y las grandes ideas que nos ha ofrecido.

Al gerente técnico y socio el Sr. Uriel Parra del laboratorio Ambiental, que nos colaboró con equipos, reactivos, materiales e instalaciones para hacer los análisis que nos permitieron darle rumbo y solución al proyecto.

Al Sr. Fredy Rojas por la colaboración de la toma de muestras y la disponibilidad de la finca en donde se llevó a cabo el proyecto, y los vecinos aledaños que nos permitieron tomar muestra del agua de sus pozos.

CONTENIDO

	Pág.
1. GLOSARIO.....	VIII
2. RESUMEN.....	1
3. LINEA DE INVESTIGACIÓN.....	2
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
5. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
6. OBJETIVOS.....	5
6.1. OBJETIVO GENERAL.....	5
6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
7. JUSTIFICACIÓN.....	6
8. MARCO REFERENCIAL.....	7
8.1. MARCO TEÓRICO.....	7
8.1.1. La biorremediación.....	7
8.1.2. Dinámica de los contaminantes en el suelo.....	8
8.1.3. Incorporación de los metales pesados en el suelo.....	11
8.1.4. Efectos del Arsénico sobre la salud de los seres vivos.....	12
8.1.5. Planta para la fitoinmovilización y fitoestabilización.....	13
8.1.6. Suelos arenosos.....	15
8.2. MARCO HISTÓRICO.....	16
8.2.1. Contaminación del suelo en Colombia.....	16
8.2.2. Biorremediación de suelos en la Región Andina.....	17
8.2.3. Degradación de suelo.....	18
8.2.4. Trazas de contaminantes en agroquímicos.....	20
8.3. MARCO LEGAL.....	22
8.4. MARCO GEOGRÁFICO.....	23
8.4.1. Espinal.....	23
9. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	26
10. PLAN DE TRABAJO.....	27
11. DATOS MUESTREO.....	30

11.1.	MDS 01 - MUESTRA DE SUELO NO 1	30
12.	PROCEDIMIENTO EN LABORATORIO PARA DETECTAR PRESENCIA DE CONTAMINANTES	31
12.1.	DETERMINACIÓN DE DENSIDAD APARENTE EN SECO.....	31
12.2.	DETERMINACIÓN DE TEXTURA.....	31
12.3.	HUMEDAD BASE SECA (H _{BS})	32
12.4.	pH Y CONDUCTIVIDAD.....	32
12.5.	DETERMINACIÓN DE METALES	33
12.5.1.	Curva de calibración.....	35
12.6.	DETERMINACIÓN DE POF'S Y POC'S	35
13.	TOMA DE MUESTRAS	36
13.1.	MDS 02 (MUESTRA DE SUELO NO 2).....	37
13.2.	MDS 03 (MUESTRA DE SUELO NO 3).....	37
13.3.	MDS 04 (MUESTRA DE SUELO NO 4).....	38
14.	SIEMBRA DE <i>Brachiaria decumbens</i>	39
15.	RESULTADOS DE LABORATORIO	41
15.1.	DENSIDAD	41
15.2.	TEXTURA	41
15.3.	HUMEDAD	43
15.4.	pH Y CONDUCTIVIDAD.....	43
15.5.	ANÁLISIS CROMATOGRÁFICOS	44
15.5.1.	Sustancias organofosforadas	44
15.5.2.	Sustancias organocloradas.....	45
15.6.	RESULTADOS METALES PESADOS.....	47
15.7.	CONSOLIDACIÓN RESULTADOS LABORATORIO.....	48
15.8.	RESULTADOS ANÁLISIS AGUA SUBTERRÁNEA	49
16.	PROCEDIMIENTO EN LABORATORIO, ESPECÍFICO PARA DETECTAR PRESENCIA DE ARSÉNICO.....	52
16.1.	DETERMINACIÓN DE ARSÉNICO	52
17.	GRÁFICAS EFICIENCIA DE LA FITORREMEDIACIÓN.....	53
17.1.	MDS 2:.....	53
17.2.	MDS 3:.....	53

17.3.	MDS 4:	54
18.	RESULTADOS FINALES DE LA FITORREMEDIACIÓN	55
19.	GRÁFICAS DE COMPORTAMIENTO	56
19.1.	SIEMBRA 1	56
19.2.	SIEMBRA 2	56
19.3.	SIEMBRA 3	57
20.	BALANCE DE MASA EN LA FITORREMEDIACIÓN	58
20.1.	DIAGRAMA DE PROCESO.....	58
20.1.1.	Proceso inicial	58
20.1.2.	Análisis del proceso	58
20.1.3.	Análisis del proceso	59
20.1.4.	Tratamiento del sustrato	59
21.	DISTRIBUCIÓN EN LA <i>Brachiaria decumbens</i> DE LA CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO	62
21.1.	ANÁLISIS DE LA SEMILLA.....	62
22.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	64
23.	CONCLUSIONES	65
24.	RECOMENDACIONES	66
25.	BIBLIOGRAFÍA.....	67

LISTA DE GRÁFICOS

Pág.

Gráfico 1: Esquema de Fitorremediación.....	8
Gráfico 2: Arsénico (Metaloides).....	13
Gráfico 3: Ubicación Espinal, Tolima.....	23
Gráfico 4: Puntos de muestreo suelo y agua Finca la Reforma, Espinal Tolima	24
Gráfico 5: Procedimiento para realizar una toma de muestra.....	27
Gráfico 6: Equipos de Laboratorio para determinación de metales pesados.....	28
Gráfico 7: Plan de trabajo.....	29
Gráfico 8: Toma de muestra en la Finca la Reforma.....	30
Gráfico 9: Preparación de la muestra para determinar Textura.....	31
Gráfico 10: Medición de pH y conductividad.....	33
Gráfico 11: Análisis de metales con muestra tamizada.....	33
Gráfico 12: Equipos de absorción atómica.....	34
Gráfico 13: Curva de calibración del Arsénico.....	35
Gráfico 14: Toma de muestra, Finca la Reforma.	36
Gráfico 15: Toma de muestra, Finca la Reforma.MDS 02.	37
Gráfico 16: Toma de muestra, Finca la Reforma.MDS 03.	38
Gráfico 17: Toma de muestra, Finca la Reforma.MDS 04.....	38
Gráfico 18: Siembra <i>Brachiaria decumbens</i> MDS 02.....	39
Gráfico 19: Siembra <i>Brachiaria decumbens</i> MDS 03.....	39
Gráfico 20: Siembra <i>Brachiaria decumbens</i> MDS 04.....	40
Gráfico 21: <i>Brachiaria decumbens</i> 15 días de crecimiento.....	40
Gráfico 22: Pirámide Textura.....	42

Gráfico 23: Cromatograma comparativo POF: blanco, muestra y estándar cromatográfico.....	44
Gráfico 24: Cromatograma comparativo POC: blanco, muestra y estándar cromatográfico.....	46
Gráfico 25: Pozo finca la Reforma, Muestra 1.....	50
Gráfico 26: Pozo finca el Palmar, Muestra 2.....	50
Gráfico 27: Pozo finca el Comején, Muestra 3.....	51
Gráfico 28: Preparación muestra cuantificación Arsénico.....	52
Gráfico 29: Análisis de arsénico con muestra tamizada.....	52
Gráfico 30: Comparación nivel de descontaminación en muestra 2.....	53
Gráfico 31: Comparación nivel de descontaminación en muestra 3.....	53
Gráfico 32: Comparación nivel de descontaminación en muestra 4.....	54
Gráfico 33: Comparación nivel de descontaminación en siembra 1.....	56
Gráfico 34: Comparación nivel de descontaminación en siembra 2.....	56
Gráfico 35: Comparación nivel de descontaminación en siembra 3.....	57
Gráfico 36: Proceso inicial.....	58
Gráfico 37: Análisis del proceso.....	58
Gráfico 38: Ecuación de balance.....	59
Gráfico 39: Análisis del proceso.....	60
Gráfico 40: Constante cinética.....	60
Gráfico 41: Semilla de <i>Brachiaria</i>	62

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1: Características Generales de la <i>Brachiaria decumbens</i>	14
Tabla 2: Biorremediación en la región Andina, Colombia.....	17
Tabla 3: Características cultivos afectados por Agroquímicos en Colombia.....	19
Tabla 4: Componentes de los Agroquímicos.....	20
Tabla 5: Matriz Legal Colombiana de suelos.....	22
Tabla 6: Características Espinal, Tolima.....	23
Tabla 7: Corrección Temperatura.....	32
Tabla 8: Compuestos Organofosforados.....	45
Tabla 9: Resultado de la cuantificación muestra.....	45
Tabla 10: Compuestos Organoclorados.....	46
Tabla 11: Resultado de la cuantificación muestra.....	47
Tabla 12: Cuantificación de Metales en suelos agrícolas del Espinal, 2013.....	48
Tabla 13: Resultados laboratorio muestra de suelo.....	49
Tabla 14: Cuantificación parámetros agua subterránea.....	49
Tabla 15: Resultados muestras de suelos.....	52
Tabla 16: Resultados siembra 1.....	55
Tabla 17: Resultados siembra 2.....	55
Tabla 18: Resultados siembra 3.....	55
Tabla 19: Comportamiento del suelo.....	59
Tabla 20: Constante cinética.....	60
Tabla 21: Cuantificación de Arsénico de la <i>Brachiaria decumbens</i> del suelo en tratamiento.....	62
Tabla 22: Cuantificación de Arsénico en la semilla de <i>Brachiaria decumbens</i>	63

1. GLOSARIO

- Absorción Atómica: Método instrumental de la química analítica que determina una gran variedad de elementos al estado fundamental como analitos¹.
- Absorción: Atracción desarrollada por un sólido sobre un líquido con la intención de que las moléculas de éste logren penetrar en su sustancia².
- Ácido orgánico: Ácido que se concentra habitualmente en los frutos de numerosas plantas³.
- Adsorción: La adsorción es la retención, adhesión o concentración en la superficie de un sólido de sustancias disueltas o dispersas en un fluido⁴.
- Agroquímico: Sustancia química muy utilizada en la agricultura, cuyo objetivo principal es mantener y conservar los cultivos⁵.
- Agua Subterránea: Es la que se encuentra bajo la superficie del suelo⁶.
- Aminoácido: Unidad química o elemento constitutivo de las proteínas que a diferencia de los demás nutrientes contiene nitrógeno⁷.
- Análisis: Distinción y separación de las partes de un todo hasta llegar a conocer sus principios o elementos⁸.
- Analito: Son especies químicas cuya presencia o concentración se desea conocer⁹.
- Arsénico: El arsénico es un elemento y un mineral que se encuentra distribuido ampliamente en el ambiente¹⁰.
- Atenuación natural: Aprovechamiento de procesos naturales para contener la contaminación causada por derrames de productos químicos y reducir la concentración y la cantidad de contaminantes en los lugares afectados¹¹.

- Atributos del suelo: Principales características de los suelos, color, estructura, textura, consistencia, espesor de los horizontes, raíces, poros, pedregosidad efectiva, actividad biológica, drenaje, etc¹².
- Bioacumulación: Efecto biológico pertinente con la capacidad que tiene un tejido vivo para acumular contaminantes, estos pueden ser eliminados o magnificados¹³.
- Biomagnificación: Tendencia de algunos productos químicos a acumularse a lo largo de la cadena trófica, exhibiendo concentraciones sucesivamente mayores al ascender el nivel trófico¹⁴.
- Biorremediación: Proceso que utiliza microorganismos, hongos, plantas o las enzimas derivadas de ellos para retornar un medio ambiente alterado por contaminantes a su condición natural¹⁵.
- *Brachiaria*: Género de plantas herbáceas perteneciente a la familia de las poáceas¹⁶.
- Carbamato: Plaguicida químico derivado del ácido carbámico¹⁷.
- Compuesto aromático: Sistema cíclico que posee una gran energía de resonancia y en el que todos los átomos del anillo forman parte de un sistema conjugado único¹⁸.
- Contaminación: Introducción de algún tipo de sustancia o energía que atenta contra el normal funcionamiento y equilibrio que ostentaba el medio inicialmente¹⁹.
- Coprecipitado: Precipitación de una o más sustancias no deseadas en un proceso²⁰.
- Cromatografía: Registro producido por la separación de sustancias gaseosas o de sustancias químicas disueltas que se desplazan a través de una columna de material absorbente que extrae las distintas sustancias en capas diferentes¹⁷.
- Defoliante: Químico que provoca la caída de las hojas¹⁶.

- Descontaminación: Sistema o metodología específica para eliminar y controlar cualquier material contaminante, ya sea éste presente en el medio ambiente o en un área determinada¹⁹.
- Desorción: Eliminación de materia desde un medio adsorbente, usualmente para recuperar material²³.
- Difusión: Lento movimiento de moléculas individuales de una región a otra²³.
- Etiología: Ciencia cuyo objeto de estudio es la causa u origen de las cosas o fenómenos²¹.
- Fitoestabilización: Es la reducción de los elementos metálicos y no metálicos por medio de adsorción en la raíz, reduciendo así la biodisponibilidad del contaminante¹⁵.
- Fitoimmobilización: Es la reducción de la disponibilidad de los metales en el suelo, mediante adsorción o absorción, precipitación o quelatación en las raíces o en la rizosfera¹⁵.
- Fitomasa: Totalidad de la materia viva vegetal¹⁵.
- Fitoquelatina: Sustancia transportadora de las células vegetales que se une a los metales¹⁵.
- Fitorremediación: Descontaminación de los suelos, depuración de aguas residuales o limpieza de aire interior, usando plantas¹⁵.
- Glutación: Sustancia que protege las células contra la oxidación y los radicales libres¹⁵.
- Hidrocarburo clorado: Insecticida persistente que se acumula en la cadena alimenticia de los sistemas acuáticos. Entre ellos está el DDT¹⁷.
- Impacto ambiental: Conjunto de posibles efectos negativos y positivos sobre el medio ambiente de una modificación del entorno natural como consecuencia de obras u otras actividades¹⁹.
- Inhibir: Impedir o ralentizar una reacción química¹⁸.
- Ligando: Molécula capaz de ser reconocida por otra provocando una respuesta biológica¹⁵.

- Metal: Cada uno de los elementos químicos buenos conductores del calor y de la electricidad, con un brillo característico, y sólidos a temperatura ordinaria, salvo el mercurio. En sus sales en disolución forman iones electropositivos (cationes)¹⁸.
- Metaloide: Elemento químico que tiene características de los metales y de los no metales¹⁸.
- Metilación: Adición de un grupo metilo (-CH₃) a una molécula²⁴.
- Muestra disturbada: Es aquella en la cual su estructura original es alterada durante el procedimiento de extracción. Se utiliza comúnmente para determinaciones de macro y micronutrientes²⁵.
- Muestra no disturbada: Es aquella que se extrae con equipos especializados²⁵.
- Organoclorado: Compuesto a base de cloro desarrollado principalmente para controlar las poblaciones de plagas⁹.
- Organofosforado: Compuesto a base de fósforo usado como plaguicida artificial⁹.
- Péptido: Molécula compuesta a partir de los vínculos que entablan los aminoácidos¹⁹.
- Plaguicida: Sustancia o mezclas de sustancias, de carácter orgánico o inorgánico, que está destinada a combatir plagas¹⁷.
- Potencial redox: Medida de la actividad de los electrones. Está relacionado con el pH y con el contenido de oxígeno²².
- Quelación: Tratamiento de eliminación de metales pesados²⁶.
- Resonancia: Estado en el cual una nota específica (o frecuencia) que estaba inactiva, comienza a vibrar en respuesta a otra de frecuencia similar que esté vibrando activamente²⁷.
- Rizosfera: Zona de interacción entre las raíces de las plantas y los microorganismos del suelo¹⁵.

- Suelo contaminado: Suelo cuyas características físicas, químicas o biológicas han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes de carácter peligroso en concentración tal que comporte un riesgo para la salud humana o el medio ambiente de acuerdo con los estándares que se determinen conforme los usos definidos del suelo previo a ser contaminado²⁹.
- Traslocación: Acción de un agroquímico cuando éste es absorbido por las raíces u hojas¹⁵.
- Vía apoplástica: Transporte de agua y elementos a través de las paredes celulares y espacios intercelulares²⁸.
- Vía simplástica: Entrada de sustancias que se difunden por transporte intermembrana²⁸.
- Xenobiótico: Compuesto externo a un organismo vivo que interacciona con él, generalmente a través de alteraciones metabólicas³⁰.

2. RESUMEN

Durante el desarrollo de este proyecto se plantea una solución a un problema medio ambiental relacionado con el suelo, recurso usado para suplir necesidades básicas del ser humano, como la alimentación. Tradicionalmente, los cultivadores de arroz del Espinal Tolima, utilizan plaguicidas cuyo componente principal es el Arsénico (As), causante de enfermedades mortales. Este elemento es acumulado en el suelo, posteriormente es lixiviado hasta las aguas superficiales, como las Quebradas Eneal y Guaduas, y hasta las aguas subterráneas utilizadas en esta parte del país para el consumo sin ningún tipo de tratamiento. La intención del proyecto es realizar los primeros ensayos de fitorremediación para disminuir la concentración del metaloide en los suelos contaminados con este. Para cumplir el objetivo fue necesario determinar las características de los contaminantes presentes en el suelo. Se identificó la alta concentración de Arsénico y se ejecutó la fitoimmobilización y fitoestabilización, hallando que la planta utilizada *Brachiaria decumbens* retuvo en su raíz el Arsénico que estaba presente en el suelo, lo que demuestra la viabilidad del proyecto en una finca de 2 hectáreas y la posible contribución para el bienestar de las especies que dependen del suelo, incluidos los humanos.

Palabras clave: Arsénico, Contaminación, Fitorremediación, Suelo.

ABSTRACT

During the development of this project it is proposed a solution to a problem related to environmental soil, this is a resource used to solve basic needs of human beings, such as food. Traditionally, the rice growers of the Spinal Tolima use pesticides whose main component is the Arsenic (As), which causes deadly diseases. This element is accumulated in the soil and then is leached to the surface water, such as the Gorges Eneal and Guaduas, and until the groundwater used in this part of the country for consumption without any type of treatment. The intention of this project is to perform the first trials of phytoremediation to decrease the concentration of the nonmetal in contaminated soils with it. To reach the objective it was necessary to determinate the characteristics of the contaminants present in the soil. It was identified the high concentration of arsenic and it was applicated the phytoimmobilization and phytoestabilization, finding that the plant used *Brachiaria decumbens* retained at its root the arsenic that was present in the soil, which demonstrates the viability of the project in a estate of 2 hectares and the possible contribution to the welfare of the species that depend on the soil, including humans.

Key Words: Arsenic, Pollution, Phytoremediation, Soil.

3. LINEA DE INVESTIGACIÓN

El presente estudio se enmarca dentro de la línea de investigación institucional de Materia, Energía y Sostenibilidad Ambiental MESA de la Escuela Colombiana de Carreras Industriales. En la agricultura el uso masivo de estos ha ocasionado daños ambientales, al suelo, al agua y al aire, en algunos casos irreparables, como ocurre con el uso y aplicación indiscriminada de agroquímicos para el cultivo de arroz. Existe una estrecha relación entre los diferentes materiales de los cuales está conformado el entorno, el uso energético requerido para su procesamiento y aprovechamiento y la necesidad de optimizar materiales y procesos para asegurar la sostenibilidad ambiental. La propuesta de fitorremediación del suelo con metales pesados está inmersa en la línea de investigación MESA, debido a que su enfoque es de carácter ambiental, es decir permite contribuir en la implementación de buenas prácticas para el aprovechamiento adecuado de los recursos naturales (suelo) y la reparación de los mismos por un uso inadecuado. Se hace un aporte social a las comunidades afectadas por las enfermedades que puedan generarse por el uso de pesticidas en el cultivo del arroz. Por otra parte, el uso de organismos vivos, particularmente de sus metabolitos o procesos metabólicos y ecológicos con fines de biorremediación, hace que este estudio aporte también a la línea de investigación del programa de Ingeniería Ambiental de biodiversidad.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Guasimal, vereda del municipio del Espinal, departamento del Tolima se conoce por ser una zona cuya principal actividad económica es el cultivo de arroz, de esta manera se convierte en el sustento económico de numerosas familias. El uso indiscriminado de agroquímicos como el carbofuran y el metilparation, en el cultivo trae consigo algunos problemas que no se han examinado hasta el momento, además los agricultores no lo ven como un impacto ecológico, económico y social ya que la problemática causada por la utilización de pesticidas, plaguicidas, herbicidas, y demás sustancias creadas para destruir la vida generan efectos a largo y mediano plazo a la salud de los seres vivos que aún no se ven reflejados. La utilización de estas sustancias ha llevado al cultivo del arroz a depender en gran medida de ellas; si no se utilizan, el cultivo no genera ganancias. Según Puentes en su libro Venenos del hogar (2006), las sustancias utilizadas en la agricultura se encuentran compuestas por sustancias cuyo principio activo se basa en moléculas de cloro, organofosforados, carbamazepinas y piretroides, algunas de las cuales contienen metales pesados como el arsénico (As), estos compuestos y elementos químicos son muy nocivos para la salud pública, producen cáncer, mutaciones y otras enfermedades³¹. En el desarrollo del proyecto se hablará acerca de la contaminación en suelos por el Arsénico empleado en los cultivos y la utilización de técnicas biorremediadoras como la fitorremediación. La contaminación por Arsénico es causante de otros problemas como la contaminación de aguas subterráneas y superficiales, que en muchos casos son distribuidas para el consumo humano y otras especies animales, trayendo consigo un fenómeno de trastorno en la salud pública (biomagnificación) y contaminación, convirtiéndose en un problema ambiental de suma importancia. Algunas especies vegetales, se han utilizado para descontaminar espacios que fueron o están siendo afectados por las actividades realizadas por los humanos. Todas las plantas, de acuerdo a su morfología y composición, tienden a extraer y utilizar del suelo, algunos elementos específicos que en ciertos casos contribuyen al desarrollo de la especie. Según la literatura, la *Brachiaria decumbens*, es una especie que por medio de la raíz, absorbe los metales pesados, entre ellos el arsénico, que se encuentran en el suelo, por esta razón el proyecto quiere demostrar la eficiencia de esta planta en los suelos en estudio.

5. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuál es la eficiencia de la fitorremediación con *Brachiaria decumbens* para recuperar los suelos contaminados con Arsénico por actividades arroceras en la Finca La Reforma?

1. ¿Cómo determinar la eficiencia de la planta utilizada en la fitorremediación de suelos contaminados con Arsénico?
2. ¿Qué partes de la planta *Brachiaria decumbens* extraen la mayor concentración de arsénico del suelo?
3. ¿Qué propiedades tiene el suelo para que los iones de los metales pesados se movilen en este?
4. ¿Qué porcentajes de remoción se obtienen con la fitorremediación del suelo contaminado?

6. OBJETIVOS

6.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la eficiencia de la fitorremediación con *Brachiaria decumbens* para la recuperación de suelos contaminados con arsénico por actividades agrícolas en el departamento del Tolima, municipio del Espinal, vereda Guasimal, finca la Reforma.

6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar parámetros fisicoquímicos a las muestras de suelos para identificar concentraciones de arsénico antes y después de la fitorremediación.
- Determinar que partes de la *Brachiaria decumbens*, empleada en la fitorremediación, extraen la mayor concentración de arsénico presente en el suelo analizado.
- Establecer las propiedades del suelo de uso agrícola del Espinal que intervienen en la movilización del arsénico.
- Determinar los valores y porcentajes de remoción del suelo contaminado con arsénico por medio de la fitorremediación con *Brachiaria decumbens*.

7. JUSTIFICACIÓN

La importancia de la fitorremediación en suelos contaminados con Arsénico, trasciende desde el punto de vista de salubridad, ya que el suelo es el recurso que permite al hombre suplir sus necesidades como las alimenticias y si este espacio no se encuentra en buenas condiciones, no será posible el progreso de las generaciones futuras. Partiendo de que el suelo utilizado en el cultivo de arroz, por diferentes familias a lo largo de los años, no tiene las condiciones ideales para seguir realizando las actividades de agricultura arroceras, se hace necesaria su restauración, por factores que lo han afectado, como es el caso de los agroquímicos. La solución planteada en este proyecto, se basa en dos tecnologías de la fitorremediación, la fitoinmovilización y la fitoestabilización, con la especie vegetal denominada *Brachiaria decumbens*, que extrae por medio de su raíz las concentraciones de los metales pesados que se encuentran en el suelo. La eficiencia de esta planta se mide por medio de los análisis de laboratorio que se hacen durante la ejecución del proyecto, demostrando que la *Brachiaria decumbens* y otras plantas tienen notables resultados en investigaciones anteriores, como es el caso del artículo de “Captación de arsénico por cultivos de raíces in vitro de *Lycopersicum esculentum*, un modelo de fitorremediación” realizado por Alférez, Araiza y Jáuregui³². Es preciso decir que el proyecto tiene un gran enfoque de aporte social, ya que los metales que se encuentran en el suelo se están lixiviando y además de ser un problema local, se puede convertir en uno nacional e incluso mundial, porque aguas subterráneas y superficiales están siendo las receptoras de estos contaminantes, que en el peor de los casos pueden causar la muerte.

8. MARCO REFERENCIAL

8.1. MARCO TEÓRICO

8.1.1. La biorremediación

De acuerdo con Bernal, Clemente, Vásquez y Walker (2007) la biorremediación es un mecanismo natural que utiliza plantas, microorganismos y otros seres vivos que contribuyen con la disminución de concentraciones de contaminantes en algún recurso y se clasifica dependiendo del ser vivo que se utilice para dicho método, una de ellas es la fitorremediación, que es el proceso de descontaminación por medio de plantas que remueven, transforman o acumulan sustancias contaminantes que se encuentran en suelos y otros recursos³³.

8.1.1.1. La Fitorremediación y sus mecanismos

La fitorremediación tiene subdivisiones según la manera de descontaminación que haga la especie vegetal.

- Fitoimmobilización: Disminución de la disponibilidad de los metales en el suelo, por medio de procesos de adsorción, absorción, precipitación, quelatación en las raíces de la planta.
- Fitoextracción: Proceso mediante el cual las plantas absorben y concentran las sustancias contaminantes en los tallos y las hojas.
- Fitoestabilización: En este proceso la especie vegetal inmoviliza elementos metálicos y no metálicos por medio de adsorción en la raíz, reduciendo así la biodisponibilidad del contaminante.
- Rizofiltración: Es la absorción de sustancias tóxicas en el agua por medio de la raíz de la planta.
- Fitovolatilización: Liberación de las sustancias a la atmósfera por la conversión de contaminantes a elementos o compuestos volátiles por medio de la especie vegetal.
- Fitodegradación: Uso de las enzimas de la planta que permite la descomposición de los contaminantes³³.
- Fitorrestauración: Es la prevención de la propagación de partículas contaminantes en un suelo inhabitado por medio de la revegetación.

- Control hidráulico: Proceso en el cual las plantas se utilizan para absorber grandes cantidades de aguas con cargas contaminadas, evitando la dispersión de las mismas³³.

En el gráfico 1 se observan algunos de los procesos mencionados anteriormente, los cuales en este caso forman un ciclo en la fitorremediación.

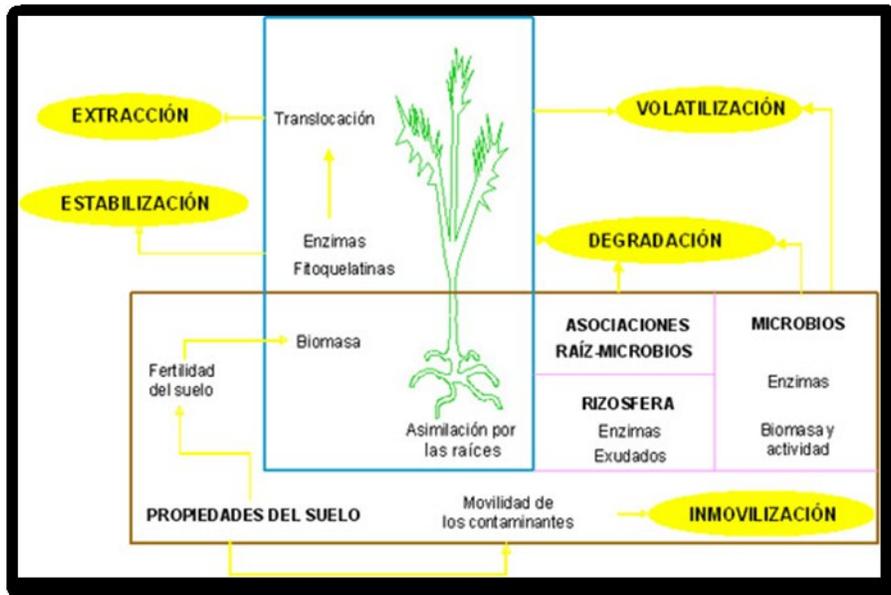


Gráfico 1: Esquema de Fitorremediación. Procesos implicados en la fitorremediación de suelos contaminados, Bernal, Clemente, Vásquez y Walker (2007)

8.1.2. Dinámica de los contaminantes en el suelo

8.1.2.1. Transporte de contaminantes inorgánicos

Según López, Ramírez, García, Ibarra y Sandoval (2011), los metales pesados son elementos químicos que cuando se encuentran en forma elemental tienen densidad igual o superior a 5 g/cm^3 y su número atómico es superior a 20. A medida que pasan por las cadenas tróficas, estos elementos tienden a ser bioacumulables y biomagnificables y cuando están en el medio con altas concentraciones generan graves problemas en el desarrollo, crecimiento y reproducción de los seres vivos. Los mecanismos de fitoinmovilización y fitoestabilización, métodos por los cuales las plantas acumulan los metales, tienen una serie de fases³⁴:

Fase I. En esta fase el metal es transportado a la planta y posteriormente al interior de la célula. La parte principal de la morfología vegetal es la raíz, ya que es esta la entrada de los

metales pesados por medio de difusión o intercambio catiónico. Las células de la raíz son de carga negativa debido a los grupos carboxilo, condición que facilita la entrada de las moléculas con carga positiva que tienen los metales pesados, permitiendo el acceso por vía apoplástica o simplástica.

Fase II. Los metales pesados son atrapados por la unión a ligandos específicos de las plantas como las fitoquelatinas que tienen como sustrato el glutatión, se componen básicamente de enlaces péptidos de ácido glutámico, cisteína y glicina.

Fase III. La composición del ligando-metal hace la detoxificación por medio de la retención que hace la vacuola³⁴.

8.1.2.2. Tecnologías de fitorremediación

De acuerdo con Solano en su libro “Movilización de metales pesados en residuos y suelos industriales”, estas se basan en los procesos fisiológicos de las plantas, como la transpiración, fotosíntesis, metabolismo y nutrición. Dependiendo del tipo de contaminante, las condiciones del sitio y el nivel de limpieza requerido, las tecnologías de fitorremediación³⁵.

Según Bernal, Clemente, Vásquez y Walker (2007) los siguientes parámetros se deben tener en cuenta para elegir el método de fitorremediación:

- Distribución heterogénea de la acidez en el suelo.
- Altas concentraciones de metales y demás elementos tóxicos.
- Variabilidad espacial de la solubilidad y toxicidad de los metales.
- Fertilidad física, química y biológica baja del sustrato, debido a la eliminación del horizonte O del suelo.
- Valor de pH en el suelo menor a cinco, ya que este no permite el crecimiento de las especies vegetales³⁵.

Cuando el suelo se encuentra en las condiciones nombradas anteriormente, hay que acondicionarlo para permitir el crecimiento vegetal, sea por introducción de la vegetación (intervención antrópica) o por desarrollo de vegetación espontánea³³.

8.1.2.3. Movilidad de los metales pesados en el suelo

López, Ramírez, García, Ibarra y Sandoval (2011) dicen que los metales pesados pueden quedar retenidos en el suelo y también pueden ser movilizados en la solución del mismo mediante mecanismos biológicos y químicos. Los metales pesados presentes en el suelo se distribuyen entre los componentes de la fase sólida, esta distribución tiene una rápida retención inicial y sus reacciones posteriores son lentas, proceso que depende del tipo de metal, propiedades del suelo, nivel de introducción y tiempo de exposición al metal. La movilidad en los suelos de estos elementos químicos es importante por su potencial para lixiviarse de los perfiles del suelo al agua subterránea y dicho potencial depende si el metal tiene origen natural o antropico³⁴.

Mulas dice que los siguientes son factores para la movilización de los elementos químicos en el suelo, teniendo en cuenta que en la transferencia de metales de fases solidas a liquidas hay una mayor afectación³⁵.

- Características del suelo: pH, potencial redox, composición iónica de la solución del suelo, capacidad de intercambio catiónico, presencia de carbonatos, materia orgánica, textura, densidad.
- Naturaleza de la contaminación: origen de los metales (natural o antrópica) y forma de deposición.
- Condiciones medioambientales: acidificación, cambios en las condiciones redox, variación de temperatura y humedad³⁶.

Según López, Ramírez, García, Ibarra y Sandoval (2011) los metales pesados pueden ser movilizados en el suelo debido a³⁴:

- La acidificación: Es el resultado de la oxidación de sulfuros minerales y precipitados y de fertilizantes de NH_4 (nitrógeno amoniacal), debido a la fijación biológica de nitrógeno, precipitación atmosférica ácida (SO_x y NO_x) sobre los suelos, descomposición de materia orgánica, agotamiento de bases por lixiviación y vertidos de contaminantes ácidos.
- Cambios en las condiciones redox: Las condiciones oxidantes pueden causar la oxidación y la disolución de sulfuros insolubles y las condiciones reductoras pueden originar la

disolución de óxidos, la liberación de sus elementos traza coprecipitados en la solución y la precipitación de sulfuros insolubles de elementos traza.

- Complejación de especies metálicas con ligandos orgánicos: Los ligandos son constituyentes químicos que se combinan con los metales en un complejo químico.
- Cambios en la composición iónica de la solución del suelo: Pueden tener un marcado efecto en la adsorción de elementos traza y su incorporación en complejos inorgánicos solubles e insolubles. Hay cuatro tipos de efectos: Competición por los sitios de adsorción, formación de complejos solubles e insolubles, efectos de fuerza iónica³⁴.

8.1.2.4. Metilación

Solano dice que este proceso puede alterar el movimiento y la pérdida de ciertos elementos traza y agravar la toxicidad para organismos vivos, las metil-especies pueden volatilizarse y llegar a la atmósfera, también se pueden acumular en la materia orgánica del suelo o en tejidos ricos en lípidos de plantas y fauna. Este mecanismo hace que metales como As (arsénico), Hg (mercurio), Sb (antimonio), Se (selenio) y Sn (estaño) puedan ser transformados en metil-especies, como $\text{CH}^+3 \text{As}$ (metil-arsénico) que se bioacumula y perjudica la cadena alimenticia³⁵.

8.1.3. Incorporación de los metales pesados en el suelo

Según Moreno (2010) debido a la toxicidad potencial de los metales pesados que afectan a la biota y amenazan indirectamente la salud humana, por medio de la contaminación de agua subterránea y la acumulación de los mismos en los suelos contaminados, que a su vez afectan los cultivos, ha crecido el interés por el estudio y análisis de estos recursos, sobre todo del suelo, ya que por medio de este hay transferencia al agua³⁷.

De acuerdo con Solano los metales pesados pueden incorporarse al suelo por diferentes vías:

- Retención en el suelo: Este se genera por la disolución en la fase acuosa del suelo, ocupando sitios de intercambio o específicamente adsorbidos sobre constituyentes inorgánicos del suelo, asociados con la materia orgánica del mismo y/o precipitados como

sólidos puros o mixtos. Los metales se precipitan debido a los cambios en el pH, oxidación y otros cambios de su composición química.

- Absorción por plantas e incorporación a las cadenas tróficas.
- Volatilización hacia la atmósfera, volviendo a la superficie por medio de precipitaciones³⁵.

8.1.4. Efectos del Arsénico sobre la salud de los seres vivos

Según Bundschuh, Pérez, Litter, el arsénico es un metaloide, que se encuentra en la naturaleza como un compuesto inorgánico y orgánico, las formas inorgánicas son más tóxicas que las formas orgánicas, aunque hay gran variación de toxicidad en los compuestos arsenicales de uno y otro tipo. La intoxicación por arsénico es el arsenicismo, el cual puede ser agudo, sub-agudo y crónico⁴².

Según el Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas (IPCS), si un ser humano ingiere gran cantidad de arsénico, en forma directa, provocara un envenenamiento rápido y posteriormente la muerte. Órganos como el intestino, el hígado, el cerebro, el corazón y sistemas como el nervioso se ven afectados. Las personas que sobreviven a un envenenamiento con este elemento desarrollan pigmentación en la piel y daños en la médula ósea (producción de glóbulos rojos)⁴³. La exposición con altos niveles de arsénico, a largo plazo, causa espesamiento de la piel, aparición de manchas de pigmentación, cáncer de piel, pulmón, vejiga o riñón. La exposición a través de la inhalación de aire, puede causar cáncer de pulmón y el hábito de fumar incrementa el riesgo de este tipo de cáncer⁴⁴.

8.1.4.1. Arsénico inorgánico

Según Parada, 2009, el arsénico inorgánico se encuentra en la naturaleza formando compuestos como las piritas (rocas) y los sulfuros (As_2S_2 , As_2S_3). Tanto en sus formas trivalentes como As_2O_3 (trióxido de arsénico) y las sales del ácido arsenioso llamadas arsenitos, como en forma de pentavalentes (arseniato), el arsénico inorgánico tiene uso industrial, es componente de pinturas, agroquímicos y otros productos. Como sulfuro se encuentra en minerales como el cobre, plomo, hierro, níquel y cobalto. La aplicación de calor para el refinado de cobre genera trióxido de arsénico, el cual se volatiliza y es arrastrado por los gases de la chimenea y se transforma en

contaminante ambiental; el humo formado por industrias procesadoras de mineral de cobre (produce arsénico inorgánico) ha llegado a contaminar el ecosistema agropecuario⁴⁵.

8.1.4.2. *Arsénico orgánico*

Parada en el 2009 cita que los compuestos como el ácido arsánico y otras sales de ácidos como el fenilarsónico y bencenarsónico son aditivos del alimento de cerdos y aves, ya que son usados como promotores de crecimiento y mejoran la eficiencia alimenticia, además tratan algunas enfermedades entéricas, esto quiere decir que las intoxicaciones por estas sustancias compuestas por arsénico orgánico, generalmente ocurren por dosificaciones equivocadas en los alimentos⁴⁵. Si la intoxicación se genera, el arsénico orgánico afecta principalmente el sistema nervioso, causando desmielinización de tractos medulares y nervios periféricos, ceguera y otros efectos de origen central³². Las investigaciones de patología sobre estos efectos nocivos no son muy conocidas⁴⁴.

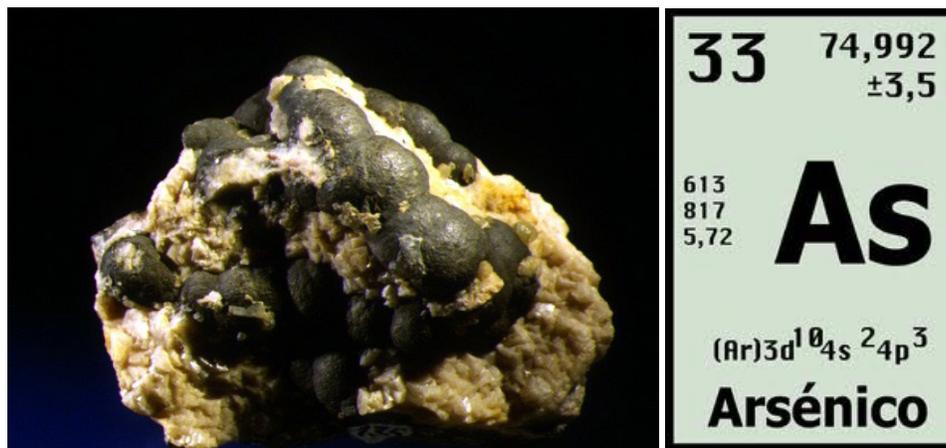


Gráfico2: *Arsénico (Metaloide)*. Fotografía de Sanchís C. (2007)

8.1.5. **Planta para la fitoinmovilización y fitoestabilización**

Según Garbisu, Aizpurua, Hernández y Zarate (2005), la *Brachiaria decumbens* presenta una alta tasa de crecimiento, elevada fitomasa, tolerancia a los metales, y la característica para acumular metales en sus tejidos⁴⁶. Algunas plantas poseen genes que son capaces de regular la cantidad de metales presentes en los suelos por medio de las raíces. Estos genes controlan los procesos de solubilidad en los metales y el transporte de los mismos y de proteínas en la zona que rodea la raíz⁴⁷. La familia de la *B. decumbens* se conoce por tener la capacidad de acumulación de metales⁴⁸. La especie vegetal usada para la fitoinmovilización y la fitoestabilización del proyecto es la *Brachiaria decumbens*, debido a que se ha demostrado su desempeño de absorción y traslocación, por ejemplo, con el Cromo en el proyecto denominado fitorremediación: estudio de inteligencia tecnológica competitiva (2009) (Autores: Saad, Castillo y Rebolledo)⁴⁹, con el Aluminio, caracterización de dos gramíneas forrajeras de *Brachiaria* y sus recombinantes genéticos por su adaptación a suelos con bajo fósforo disponible y alta saturación de Aluminio en Palmira (2007) (Autor: Mejía)⁵⁰ por medio de los procesos de, según Díaz (2006):

- Quelación: Reacción química de los agentes quelantes (sustancias formadoras de complejos con metales pesados) para quitar los metales pesados.
- Precipitación
- Compartimentalización: Es la capacidad que tiene la envoltura del núcleo, para permitir que el mismo controle su contenido y lo separe del resto del citoplasma cuando es necesario⁵¹.

Tabla 1: Características Generales de la *Brachiaria decumbens*

Característica	<i>Brachiaria decumbens</i>
<i>Fertilidad de suelo</i>	Baja, media
<i>Forma de Crecimiento</i>	Estolonífero
<i>Altura</i>	0,6 a 1,0 m.
<i>Utilización</i>	Pastoreo directo, heno
<i>Digestibilidad</i>	Buena
<i>Palatabilidad</i>	Buena
<i>Tolerancia a la seca</i>	Media
<i>Tolerancia al frío</i>	Media
<i>Tenor de proteína en la materia seca</i>	6 a 10%
<i>Profundidad de siembra</i>	2 a 4 cm
<i>Ciclo Vegetativo</i>	Perenne
<i>Producción de forraje</i>	11 a 18 ton. Ms/ha/año
<i>Resistencia al salivazo</i>	Buena

Nufarm Colombia S.A

8.1.5.1. Características Agronómicas de la *B. decumbens*

Según la ficha técnica de TVGAN, la especie vegetal *Brachiaria decumbens* tiene un tiempo de formación de 90 a 100 días⁵², en los primeros días de su crecimiento, consume la mayor parte de los nutrientes suministrados por el suelo para su eficiente desarrollo, después de este lapso de tiempo la planta los comienza a consumir en menor cantidad⁵³. Es una gramínea que tiene origen el África. Puede alcanzar hasta los 120 cm de altura, el cultivo se puede adaptar a condiciones climatológicas secas y húmedas (las precipitaciones pueden sobrepasar los 1000mm/año). Se adapta bien a suelos infértiles y ácidos, Forma pastizales que logran tolerar el pisoteo y pastoreo intenso⁵⁴.

8.1.6. Suelos arenosos

Estos suelos tienen como característica principal que se secan rápidamente y hay que regarlos lo suficiente. No almacenan el agua como los suelos arcillosos. El riego por goteo en este tipo de suelo es el más recomendable. En un suelo arenoso es más difícil para una planta soportar la sequía, que en un suelo arcilloso, esa condición depende de la especie vegetal. Estos suelos tampoco retienen bien los nutrientes minerales que necesitan las plantas. La lluvia y el riego lo lava de la zona de las raíces, perdiéndose en profundidad, lo anterior se debe a la porosidad del suelo. El suelo arenoso es pobre en nutrientes minerales, hay que abonar más que en uno arcilloso que suele tener más reservas nutritivas. En esta clase de suelo las raíces disfrutan de una buena aireación por la mayor porosidad existente. El drenaje también suele ser muy bueno. Para plantas que necesitan un buen drenaje son muy buenos, a condición de que no le falte el agua. Los céspedes, cactus y crasas, por ejemplo son plantas que se desarrollan bien en un suelo arenoso, puesto que no soportan el exceso de agua que se da con frecuencia en los suelos pesados, de arcilla. Los suelos arenosos no poseen la capacidad para fijar los metales pesados, los cuales pueden pasar rápidamente al subsuelo y pueden contaminar los niveles freáticos invernadero Novo (2004)⁶¹.

8.2. MARCO HISTÓRICO

8.2.1. Contaminación del suelo en Colombia

Según el Ministerio de Ambiente y protección social en abril de 2003, en su informe de legislación ambiental, en algunos casos el origen de la contaminación se debe a productos xenobióticos, cuyo uso es habitual en la agricultura basada en el empleo de agroquímicos. La contaminación se produce cuando se exceden las dosis recomendadas o cuando se utilizan productos que han sido prohibidos. Esto ocurre generalmente en algunos países en vía de desarrollo en los que se siguen empleando productos contaminantes y se suma la inexistencia de normativas legales adecuadas. En otros casos, las contaminaciones son causadas al querer utilizar el suelo como depurador natural, realizando aportes que superen su capacidad de aceptación o por incorporaciones incontroladas (atmosféricas o vertidos)³⁸.

8.2.1.1. Principales fuentes de contaminación potencial de los suelos en Colombia

- Fitosanitarios y sus productos de degradación.
- Purines, en explotaciones ganaderas sin o con suficiente tierra.
- Lodos de depuración.
- Contaminantes atmosféricos aportados al suelo por deposición, tanto seca como húmeda, principalmente en áreas industriales o bajo su influencia.
- Aguas residuales empleadas para el riego.
- Residuos industriales y urbanos.
- Fertilizantes utilizados de forma intensiva y en exceso.
- Metales (Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, Sn, Ba, Hg, Pb).
- Compuestos inorgánicos (NH₄, CN total, S₂ total, Br, PO₄.)
- Compuestos aromáticos y poliaromáticos.
- Hidrocarburos clorados.
- Agroquímicos³⁸.

8.2.2. Biorremediación de suelos en la Región Andina

Tabla 2: Biorremediación en la región Andina, Colombia

REGIÓN	ANDINA
DESCRIPCIÓN	Entre la cordillera Central y la cordillera Occidental desde el Nudo de los Pastos en dirección sur norte pasando por la Hoz de Minamá en la cuenca de Patía y se prolonga hasta las planicies de la región Caribe. En la cordillera desde el Valle Magdalena por el occidente y los llanos Orientales por el oriente su litología la conforman los macizos de Garzón, Quetame y Bucaramanga.
T° PROMEDIO (°C)	Máximo 28 – Mínimo 0 (En los nevados)
PH	Básico cercano a la neutralidad
HUMEDAD RELATIVA	65% aproximadamente
SUELOS MAS PREDOMINANTES	Andisoles
SUELOS MENOS PREDOMINANTES	Molisoles - Alfisoles - Oxisoles - Ultisoles
TIPO DE BIORREMEDIACION RECOMENDADA EN EL TIPO DE SUELO	Bioelectrocinética

Universidad Nacional de Colombia. Biorremediación Suelos Contaminados por Hidrocarburos (2009)³⁹.

En la anterior tabla se identifican las características de la región Andina, región en donde se localiza el lugar en el cual se realizó la fitoinmovilización y fitoestabilización, allí se visualizan los tipos de suelos, el clima, la temperatura y pH, además se observa que se han realizado proyectos y procesos por medio de la biorremediación y que la más utilizada ha sido la bioelectrocinética que consiste en utilizar corriente eléctrica para disminuir los hidrocarburos, pero hace poco tiempo se ha optado por usar los procesos de fitorremediación.

En Colombia la política agrícola y la educación, impulsaron las prácticas convencionales e impusieron los agroquímicos como paradigma. Las tierras se desnudaron de toda cobertura para copiar la agricultura norteamericana de monocultivo y cielo, sembrando cultivos de cereales y de bajo precio por su volumen mundial, con tractores y arados, maquinaria y equipo para aplicar pesticidas en suelos desnudos sometidos a recepción indiscriminada de estos agroquímicos. Por

degradación, el suelo perdió su capacidad de infiltrar y conservar la humedad natural, haciendo necesario el riego. Se hicieron millonarias inversiones para adecuar las tierras, siguiendo el mismo patrón de agricultura importada⁴⁰.

8.2.3. Degradación de suelo

De acuerdo con el Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales la acidificación y la toxicidad, por el mal manejo de los fertilizantes y pesticidas, y la salinización, especialmente por diseños, operación y mantenimiento deficientes de los distritos de riego y drenaje, son otras de las causas de la degradación de los suelos.

En la tabla 3 se presentan los niveles alto (3), medio (2) y bajo (1) de degradación por compactación, agroquímicos y salinización. De acuerdo con la tabla todos los suelos usados en agricultura intensiva de zona plana presentan degradación física, química y biológica. Según el IDEAM las áreas más afectadas por la compactación, agroquímicos y salinización son: la altiplanicie cundiboyacense, la zona Tocaima – Girardot y las llanuras del Tolima. Las zonas más afectadas por agrotóxicos corresponden al altiplano de Rionegro, altiplano cundiboyacense, llanuras del Tolima, llanuras del Huila, zona Tocaima – Girardot, Rio Sinú, Aquitania, Valle de Samacá y Ábrego⁴¹.

En la tabla 3 también se identifica que el proceso llevado a cabo para el cultivo de arroz es uno de los mayores causantes de alta contaminación en el suelo, debido a la utilización de agroquímicos para su producción. Por otro lado se observa que cultivos como el plátano, el banano, la caña de azúcar presentan baja degradación del sustrato. En el suelo de estudio el cultivo de arroz es el más utilizado en las actividades agrícolas, por esta razón el uso de los pesticidas es mayor y como consecuencia se encuentran las concentraciones altas de arsénico.

Tabla 3: Características cultivos afectados por Agroquímicos en Colombia

No.	Cultivos	Área (ha)	Degradación física compactación				Degradación química y biológica				Total	
			Alta	Media	Baja	Subtotal	Contaminación por agroquímicos			Subtotal		Salinización
							Alta	Media	Baja			
1	Banano, Plátano	118.780			1	1			1	1		2
2	Arroz, Sorgo, Maíz, Yuca	302.280	3			2	3			2	3	7
	Palma Africana y Plátano				1				1			0
3	Arroz, Sorgo	289.512	3			2	3			2	3	7
	Palma Africana y Banano				1				1			0
4	Arroz, Algodón y Sorgo	1.506.458	3			2	3			2	3	7
	Palma Africana				1				1			0
5	Arroz, Algodón y Sorgo	308.679	3			3	3			3		6
6	Papa, Frijol y Flores	23.264			1	1	3			3		4
7	Arroz, Sorgo	26.202	3			2	3			2		4
	Palma Africana				1				1			0
8	Arroz, Sorgo	471.014	3			2	3			2		4
	Palma Africana				1				1			0
9	Cebolla	2.484	3			3	3			3		6
10	Hortalizas	14.570			1	1			1	1		2
11	Papa, Flores, Cebada, Trigo	181.246	3			3	3			3	3	9
12	Arroz, Algodón y Sorgo	33.061	3			3	3			3	3	9
13	Arroz, Algodón y Sorgo	315.770	3			3	3			3	3	9
14	Arroz, Maíz, Sorgo	173.701	3			2	3			2		4
	Palma Africana				1				1			0
15	Algodón y Sorgo	410.326	3			2	3			2	3	7
	Caña de azúcar				1				1			0
16	Arroz, Maíz, Sorgo	48.245	3			3	3			3		6
17	Papa, Cebada, Trigo	115.105			2	2	3			3		5
18	Cebolla y Frijol	6.087			2	2	3			3		5

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Productividad, estabilidad y degradación de los suelos en Colombia.

8.2.4. Trazas de contaminantes en agroquímicos

Tabla 4: Componentes de los Agroquímicos.

INSECTICIDAS MINERALES	MINERALES	Compuestos arsenicales
		Compuestos fluorados
	ORGANICOS DE SINTESIS	Organofosforados
		Organoclorados
		Carbamatos
	A BASE DE ACEITES MINERALES	Aceites antracénicos
	DE ORIGEN VEGETAL	Aceites de petróleo
		Nicotina
Piretrina		
HERBICIDAS	MINERALES	Rotenona
		Sales de NH_4^+ , Ca^{++} , Cu^{++} , Fe^{+++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+ , en forma de sulfatos, nitratos, cloruros, cloratos.
	ORGANICOS	Fitohormonas
		Derivados de la urea
		Triazinas y Diazinas
		Derivados de los fenil sustituidos y las quinoxalinas
		Derivados de la oxiquinoleína
		Derivados de las tiadizinas y tiadiazoles
	OTROS	Parquat
		Diquat
Piclorame		
FUNGUICIDAS	MINERALES	Sales de cobre
		Compuestos arsenicales
		Aceites minerales
	ORGANOMETALICOS	Derivados órganomercuriales
	ORGANICOS	Carbamatos y ditiocarbamatos
		Derivados del benceno
		Amicidas
Benzonitrilos		

Universidad Nacional de la Plata. Intoxicaciones Alimentaria (2009).

La anterior tabla describe la composición de algunos agroquímicos y demuestra que unas de las sustancias minerales están compuestas por arsénico, información que permite confirmar el alcance y el objetivo del proyecto.

Debido a la farmacodinamia del arsénico, se han comprobado diferentes enfermedades y afectaciones que causa el consumo temporal o permanente de este elemento. A continuación se describen algunos efectos nocivos del arsénico.

8.3. MARCO LEGAL

Tabla 5: Matriz Legal Colombiana de suelos

TIPO DE NORMA	NORMA JURIDICA	AÑO	ARTÍCULOS	TEMA
Ley	2	1959	Todos	Se establecen Zonas Forestales Protectoras y Bosques de interés general, el suelo es imprescindible para la estructura y función de los ecosistemas
Ley	23	1973	Todos	Determina como bien contaminable el suelo
Decreto	2811	1974	Todos	Se considera que la degradación y la erosión del suelo son factores que deterioran el ambiente, y uso, aprovechamiento y conservación del recurso suelo
Ley	9	1979	35	Prohibida la disposición de residuos que deterioren el suelo y en casos en que sea autorizado se debe restaurar o mejorar el recurso
Decreto	2104	1983	Todos	Manejo de residuos para evitar la contaminación de suelos
Decreto	1974	1989	Todos	Recuperación de suelos con alto grado de erosión, suelos salinizados, suelos contaminados con agroquímicos
Resolución	2115	2007	Todos	Límites permisibles agua potable (As)
Norma Internacional Louisiana	----	2008	29B	Límites permisibles recurso suelo

Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. *Legislación del Recurso Suelo en Colombia (2013)*

8.4. MARCO GEOGRÁFICO

8.4.1. Espinal

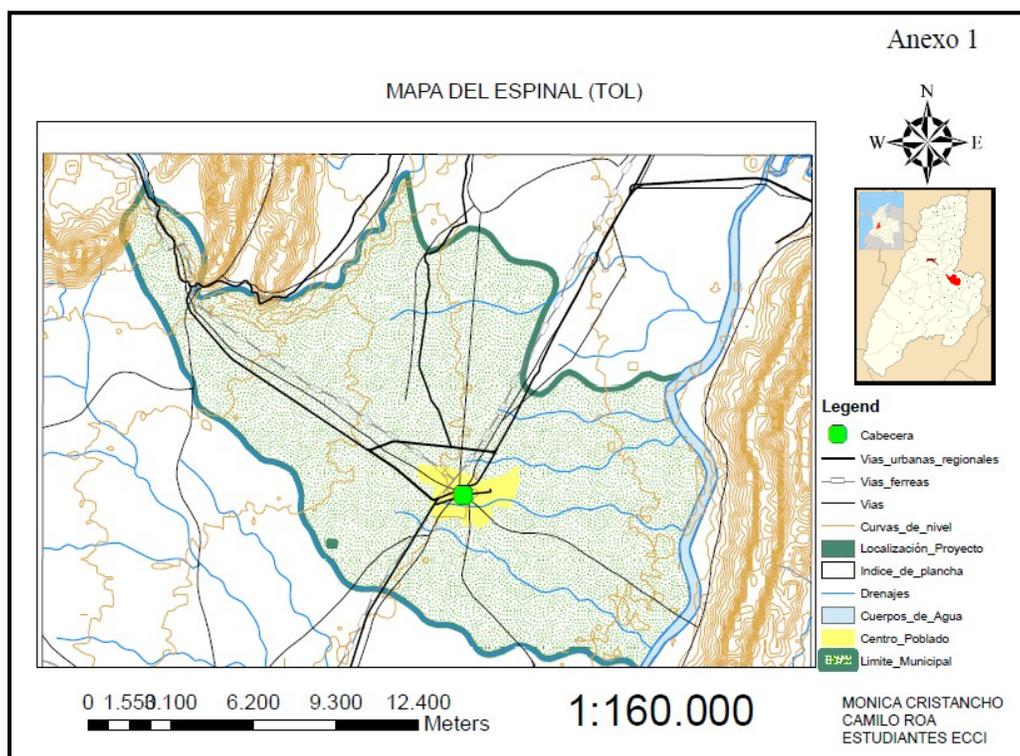


Gráfico 3: Ubicación Espinal, Tolima, Autores, 2013

(Anexo 1, Mapa del Espinal, Tolima)

Tabla 6: Características Espinal, Tolima

País:	Colombia	Clima:	Cálido
Departamento:	Tolima	Temperatura	27 - 36 °C
Región:	Andina	Población:	76.226 habitantes.
Provincia:	Ibagué	Extensión total:	231 Km ²
Ubicación:	04°09'N 74°53'O	Extensión área urbana:	4,26 Km ²
Altitud:	323 msnm	Extensión área rural:	212,74 Km ²
Superficie:	217 Km ²	Distancia de referencia:	a 48 Km de Ibagué

Generalidades municipio del Espinal. Página web municipio del Espinal. <http://www.lespinal-tolima.gov.co/index.shtml>

8.4.1.1. Límites del municipio

Norte: Con el Municipio de Coello: desde la confluencia de la quebrada la Morena con el Río Coello, lugar de concurso de los territorios de los Municipios de Flandes, Espinal y Coello, agua arriba hasta el sitio la Colorada donde enfrenta el cerro La Ventana al Río Coello, lugar de concurso de los territorios de los Municipios del Espinal, San Luis y Coello. Con el Municipio de Flandes: Desde la confluencia del Río Coello con la Quebrada La Morena sigue hasta encontrar el borde occidental del carretable Chicoral-Flandes para luego encontrar el carretable el Pital. **Sur:** Con el Municipio del Guamo: desde la desembocadura de la Quebrada Eneal hasta su nacimiento y de aquí en línea recta hasta el cerro La Ventana.

Sur: Con el Municipio del Guamo: desde la desembocadura de la Quebrada Eneal hasta su nacimiento y de aquí en línea recta hasta el cerro La Ventana.

Oriente: Con el Municipio de Suarez: partiendo de la terminación del camino carretable del Pital con el Río Magdalena, se sigue el cauce del Magdalena, aguas arriba hasta donde desemboca la Quebrada Eneal.

Occidente: Con el Municipio de San Luis: partiendo desde el cerro La Ventana se sigue en dirección general noroeste hasta su terminación en el Río Coello⁵⁵.

8.4.1.2. Límites de la vereda Guasimal

Norte: Vereda Sucre

Sur: Vereda Samán y Quebrada Eneal

Oriente: Vereda Pasoancho

Occidente: Vereda Dindalito

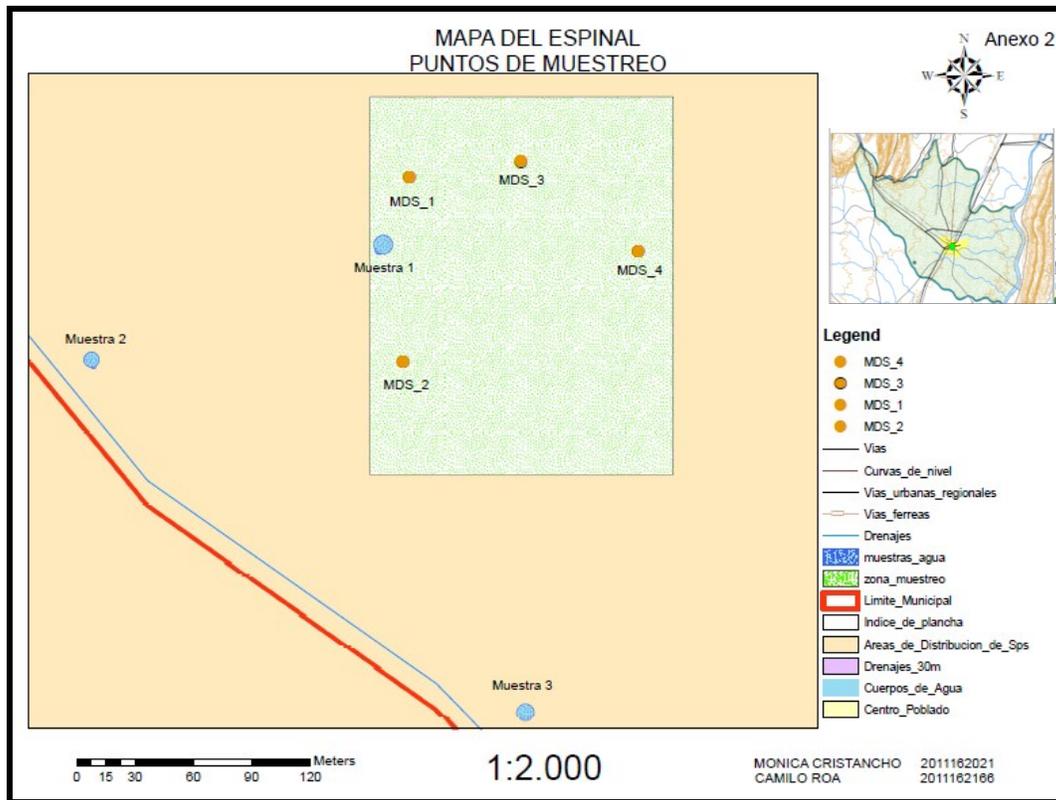


Gráfico 4: Puntos de muestreo suelo y agua Finca la Reforma, Espinal Tolima, Autores, 2013

En el gráfico 4 se observan los puntos de muestreo de suelo y agua ubicados en la vereda Guasimal, municipio del Espinal, Departamento de Tolima. En la finca la Reforma, que se identifica el gráfico con un rectángulo, se tomaron las muestras de suelo y una de las muestras de agua de pozo. En fincas aledañas se tomaron las muestras restantes de agua.

Las muestras de suelo se tomaron en diferentes zonas de la finca la Reforma, para conocer si la contaminación se distribuía en toda el área.

Los límites del proyecto son al Sur: Quebrada Eneal y Finca el Comején, al oriente con la Finca el Palmar, al norte y al occidente con la Finca de Rubén Sánchez.

9. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto se planteó para fitorremediar el suelo de una finca ubicada en el Espinal, Colombia, que es y ha sido usada para cultivar arroz, cereal bastante comercializado para el consumo humano en el país, es por esta razón que las personas encargadas de cultivarlo exigen un alto rendimiento de sus cultivos, motivo por el cual utilizan agroquímicos, que son sustancias o mezcla de las mismas con composición orgánica o inorgánica, que tienen como fin combatir insectos (insecticidas), ácaros, roedores y otras especies indeseables de plantas (herbicidas), hongos (fungicidas) y animales que interfieren en la producción, elaboración, almacenamiento, transporte o comercialización de alimentos y otros productos como la madera. El término agroquímico incluye también sustancias como los reguladores del crecimiento de las plantas, defoliantes, desecantes, agentes para reducir la consistencia de la fruta, agentes para evitar la caída prematura de la fruta y sustancias aplicadas a los cultivos antes o después de la cosecha, para proteger el producto contra el deterioro, durante el almacenamiento y transporte. Los agroquímicos están compuestos en su mayoría de metales pesados como el arsénico, que a través del tiempo han sido los causantes de la contaminación del suelo y cuerpos hídricos⁵⁶; “La alta utilización de agroquímicos para el control de plagas, enfermedades y malezas, han provocado la contaminación del suelo, del agua, del aire, y por ende el deterioro de la salud de los habitantes”⁵⁷.

La solución que se ha planteado para mejorar las condiciones de los recursos agua, suelo y aire, por motivos de eficiencia comprobados en diferentes proyectos a nivel mundial, es denominada fitorremediación, mecanismo que tiene diferentes clasificaciones dependiendo el fin del estudio. En este proyecto se realizara la fitoinmovilización y la fitoestabilización, que tiene como objetivo disminuir la disponibilidad de los metales pesados originados por los agroquímicos que se han venido acumulado en el suelo, por medio de procesos fisiológicos que realizan las plantas, utilizando los iones metálicos para su crecimiento y tomándolos por medio de la raíz, que tiene la función de adquirir los nutrientes necesarios para el desarrollo de la planta.

10. PLAN DE TRABAJO

El proyecto establece e identifica el problema, este debe ser analizado y verificado por medio de datos, para esto se necesita hacer muestreos en los cuales se examine y defina la concentración de metales y otras características físico-químicas del suelo del espinal Tolima, vereda el samán, finca la reforma en el cual se cultiva arroz. El muestreo es el proceso mediante el cual se busca obtener una parte representativa del suelo bajo estudio para la cual se analizaran las variables biológicas o fisicoquímicas de interés⁵⁸; proceso programado para probar, medir, registrar y analizar de manera subsecuente las variadas características de un suelo con el objetivo de evaluar la conformidad de los objetivos especificados⁵⁹. El muestreo se realizó de acuerdo con las indicaciones de la resolución 62 de 2007 del IDEAM.



Gráfico 5: Procedimiento para realizar una toma de muestra, Laboratorio Analquim 2012

Después de hacer los muestreos se analizan en el laboratorio algunos parámetros como la conductividad, pH, humedad, y en especial presencia de metales pesados, plaguicidas organoclorados (POC) y plaguicidas organofosforados (POF). Para determinar la concentración presente en los diferentes suelos, además se tomaron muestras de agua subterránea de la zona para la determinar contaminación con metales pesados⁶⁰.

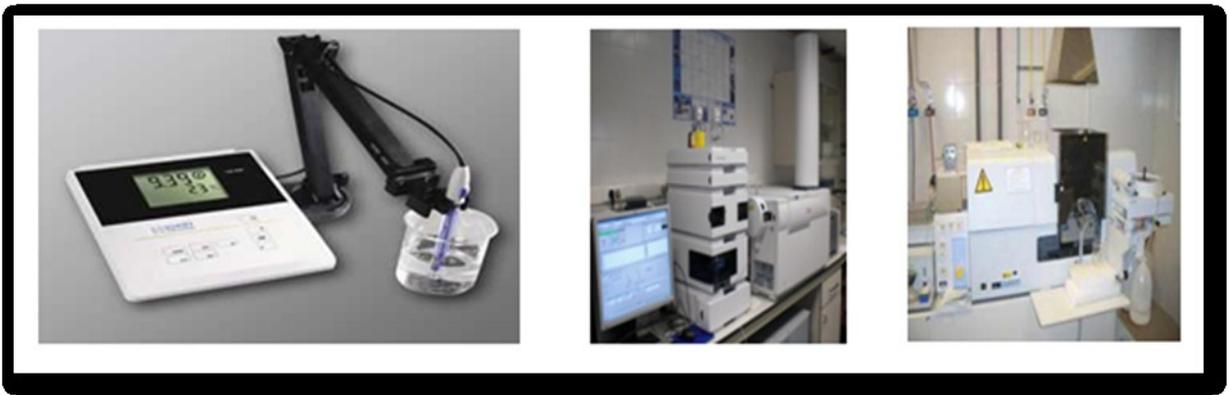


Gráfico 6: Equipos de Laboratorio para determinación de metales pesados, Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

Los equipos del gráfico 6 son un equipo para medir pH, un espectrofotómetro de absorción atómica utilizado para cuantificar metales y un cromatógrafo HPLC. Para determinar compuestos organoclorados y organofosforados.

Para la determinación de metales se utilizó en el laboratorio el método expedido por la EPA ya que es el indicado para hacer estos análisis. Se utilizó el espectrofotómetro de absorción atómica para determinar la concentración de los metales. Para los POC y los POF se hizo cromatografía de gases. Después de tener los análisis se hizo la interpretación de resultados y la utilización de medidas de fitorremediación para comenzar a descontaminar estos suelos afectados por las sustancias empleadas en los cultivos de arroz. La fitorremediación se hace ex-situ, es decir las muestras de suelo recolectadas se llevaron a un recipiente, allí se siembra la planta (*Brachiaria decumbens*), teniendo en cuenta que el lugar tendrá las mismas condiciones meteorológicas que tiene la finca de donde proviene el sustrato debido a que es un lugar aledaño, y de esta manera la planta se desarrolló en condiciones normales. En este paso se utilizaron plantas que aprovechan los metales encontrados en el suelo. Después de 15, 30, 60, 90 y 100 días se tomaron nuevas muestras para analizar la eficiencia de la fitorremediación es eficiente. En el gráfico 7 se hace la retroalimentación de los pasos que se realizaron en el proyecto de fitorremediación con *Brachiaria decumbens*.

Plan de trabajo

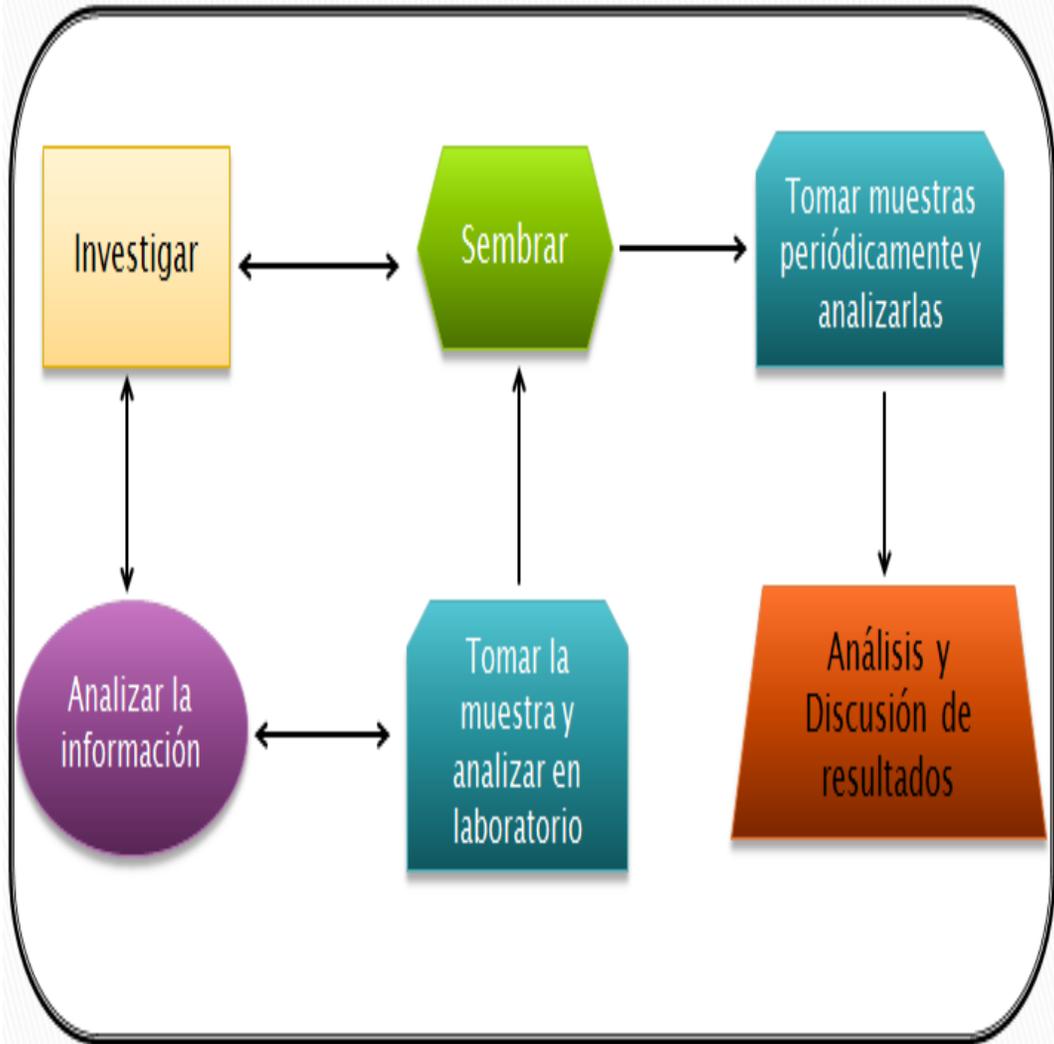


Gráfico 7: Plan de trabajo, Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

11.DATOS MUESTREO

11.1. MDS 01 - MUESTRA DE SUELO NO 1

Localización: Tolima, Espinal, Finca la Reforma, Altitud: 352 msnm, Coordenadas planas: 905079,874 - 948556,275 (Anexo 2, Mapa del Espinal, puntos de muestreo)

Fecha: Junio 8 de 2013

Uso: Cultivo Arroz

Se midió un metro a partir de la zona de cultivo para tomar la muestra, se identificó el área, y posteriormente se hizo un agujero de un metro de profundo. A continuación se tomó un cilindro con volumen conocido y de esta manera se determina la densidad aparente en seco que permite determinar la estructura del suelo. Después de este proceso se recogió un kilogramo de suelo para ser analizado en laboratorio.



Gráfico 8: Toma de muestra en la Finca la Reforma, Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

12.PROCEDIMIENTO EN LABORATORIO PARA DETECTAR PRESENCIA DE CONTAMINANTES

12.1. DETERMINACIÓN DE DENSIDAD APARENTE EN SECO

En campo se recolecto una muestra de suelo por medio de un cilindro el cual es penetrado en el suelo a presión, este abarca todo el volumen del recipiente. En laboratorio se procedió a llevar la muestra contenida en el cilindro a 105 °C durante 48 horas. Posteriormente se pesó en una balanza y se hicieron los respectivos cálculos.

12.2. DETERMINACIÓN DE TEXTURA

El procedimiento a seguir para determinar la textura es el siguiente:

- Se secó la muestra a temperatura ambiente durante 5 días.
- Se pesaron 50 g de la muestra.
- Se llenaron 2/3 partes de agua en un frasco de 230 ml.
- Se agregaron 10 ml de solución hexametáfosfato de sodio y Carbonato de Sodio.
- Se tapó el frasco y se agita durante 2 horas en agitador reciproco.
- Se transvaso la muestra a una probeta de 1 L y se completa a volumen.
- Se agito vigorosamente durante 30 segundos.
- Después de agitar se registró la hora y la temperatura, se colocó el hidrómetro dentro.
- Se registró el dato obtenido en el hidrómetro después de 40 segundos.
- Se tomó lectura del hidrómetro a las 2 horas y se realizaron los cálculos.



Gráfico 9: Preparación de la muestra para determinar Textura, Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

En el gráfico 9 se observa el proceso que se realizó para determinar la textura, se pesó en primera instancia, la muestra se colocó en el agitador reciproco para una buena homogenización. Se colocó el hidrómetro en la probeta de un litro para esperar el dato en los tiempos estimados.

Tabla 7: Corrección Temperatura

FACTOR CORRECCIÓN DE T°	
T (°C)	Factor de Corrección
15	- 1,10
16	-0,90
17	-0,70
18	-0,50
19	-0,30
20	0,00
21	0,20
22	0,40
23	0,70
24	1,00
25	1,20
26	1,65
27	2,00
28	2,50
29	3,05
30	3,80

Métodos de ensayos de suelos IGAC, 2011

12.3. HUMEDAD BASE SECA (H_{BS})

Inmediatamente luego de llegar la muestra al laboratorio se tomó una determinada cantidad de suelo y se pesó, después se secó a 105 °C durante 48 horas. Se procedió a pesar la muestra y hacer cálculos.

12.4. pH Y CONDUCTIVIDAD

Después de que la muestra llegó al laboratorio se determinó el pH y la conductividad de la siguiente manera:

- Muestra seca al ambiente.

- Relación 1:1 de Agua y muestra.
- Se pesaron 20 g de muestra, se midieron 20 ml de agua desionizada.
- Se agito durante 2 minutos con un mezclador de vidrio.
- Se dejó la muestra en reposo durante 1 hora.
- Se tomó la lectura de pH agitando el electrodo en el recipiente.
- Se tomó el sobrenadante, se llevó a una probeta de 25 ml y se leyó la conductividad.



Gráfico 10: Medición de pH y conductividad, Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

12.5. DETERMINACIÓN DE METALES



Gráfico 11: Análisis de metales con muestra tamizada, Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013
Es uno de los conjuntos de parámetros que más conciernen en el estudio, y se determinan así:

- Se llevó la muestra a un horno a 105 °C por 48 h.

- Se tamizo la muestra seca por tamiz de 0,75 mm.
- Se tomó 0,5 g de la muestra tamizada y se llevó a un erlenmeyer de 250 ml.
- Se lleva la muestra a digestión:
 - ✓ Se adicionan 10 ml de ácido nítrico 1:1 y se coloca en plancha de calentamiento durante 10 minutos por debajo del punto de ebullición.
 - ✓ Se adicionaron 5 ml de ácido nítrico (HNO_3) concentrado, se calentó 30 minutos hasta que se evapore y quede un volumen de 5 ml. Se dejó enfriar.
 - ✓ Se adicionaron 2 ml de Agua desionizada y 3 ml de peróxido de hidrogeno (H_2O_2) al 3%. Se Adiciono 1 ml de H_2O_2 si es necesario.
 - ✓ Se calentó, reduciendo el volumen hasta 5 ml.
 - ✓ Se adiciono 10 ml de ácido clorhídrico (HCl) concentrado calentándolo por 15 minutos.
 - ✓ Se filtró y completo a volumen de 100 ml.
 - ✓ Se leyó en el equipo de espectrofotometría de absorción atómica.



Gráfico 12: Equipos de absorción atómica. Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

12.5.1. Curva de calibración

Para la curva de calibración de Arsénico se tomó un estándar de concentración conocida, se hicieron diluciones para preparar cada uno de los puntos de la curva, se leyó en el equipo de espectrofotometría de absorción atómica obteniendo los siguientes resultados.

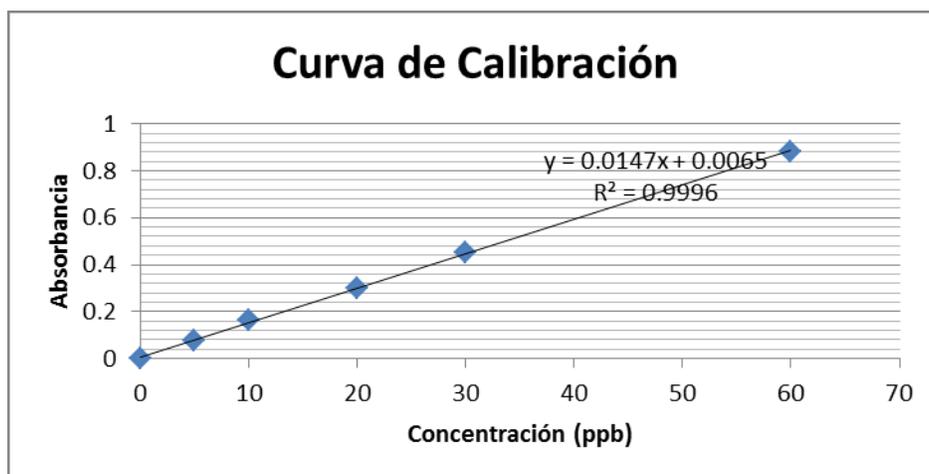


Gráfico 13: Curva de calibración del Arsénico. Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

La curva es adecuada para continuar con el análisis. A continuación la información del estándar utilizado:

Lote del Estándar de Arsénico: HC373923

Fecha de vencimiento: 28/02/2016

Marca: Merck

Concentración del Estándar: 1000 ppm

12.6. DETERMINACIÓN DE POF'S Y POC'S

En el proyecto se realizaron análisis de Pesticidas organoclorados y organofosforados con equipo cromatógrafo gaseoso con detector FID, de acuerdo con los lineamientos del estándar métodos.

13.TOMA DE MUESTRAS

Se tomaron tres muestras del suelo en diferentes lugares de la finca la Reforma con el fin de que el muestreo sea representativo y permita hacer un análisis general de la situación actual, se analizan las muestras en laboratorio y se hacen la siembra EX - SITU con cada una de las muestras para analizarlas periódicamente y determinar la eficiencia de la fitorremediación con *Brachiaria decumbens*.

Se midió un metro a partir de la zona de cultivo para tomar la muestra, se identificó el área, y posteriormente se hizo un agujero de un metro de profundo. Se recogió un kilogramo de suelo para analizar Arsénico en el laboratorio y cinco kg para hacer la siembra de la *Brachiaria decumbens*.

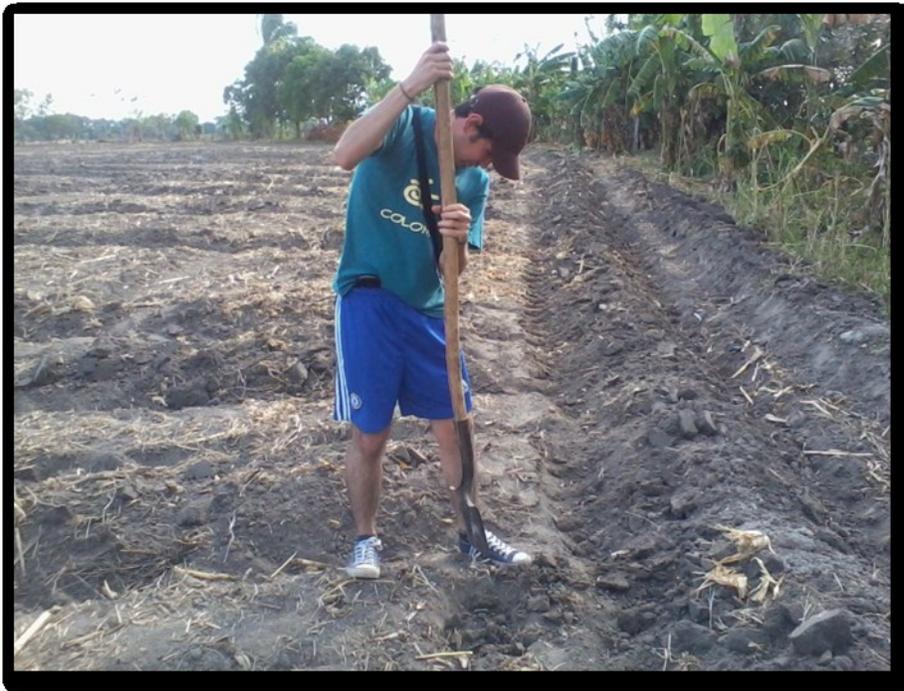


Gráfico 14: Toma de muestra, Finca la Reforma. Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

13.1. MDS 02 (MUESTRA DE SUELO NO 2)

Localización: Tolima, Espinal, Finca la Reforma, Altitud: 352 msnm, Coordenadas planas: 905076,09 – 948461,68

(Anexo 2, Mapa del Espinal, puntos de muestreo)

Fecha: Agosto 08 de 2013

Uso: Cultivo Arroz



Gráfico 15: Toma de muestra, Finca la Reforma.MDS 02. Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

13.2. MDS 03 (MUESTRA DE SUELO NO 3)

Localización: Tolima, Espinal, Finca la Reforma, Altitud: 352 msnm, Coordenadas planas: 905136,631 – 948565,734

(Anexo 2, Mapa del Espinal, puntos de muestreo)

Fecha: Agosto 08 de 2013.

Uso: Cultivo Arroz



Gráfico 16: Toma de muestra, Finca la Reforma.MDS 03. Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

13.3. MDS 04 (MUESTRA DE SUELO NO 4)

Localización: Tolima, Espinal, Finca la Reforma, Altitud: 352 msnm, Coordenadas planas: 905197,802 – 948518,437

(Anexo 2, Mapa del Espinal, puntos de muestreo)

Fecha: Agosto 08 de 2013.

Uso: Cultivo Arroz



Gráfico 17: Toma de muestra, Finca la Reforma.MDS 04. Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

14.SIEMBRA DE *Brachiaria decumbens*



Gráfico 18: Siembra *Brachiaria decumbens* MDS 02. Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

Se procedió a sembrar el pasto en cada una de las muestras tomadas, se hizo a unos 3 cm de profundidad del sustrato.



Gráfico 19: Siembra *Brachiaria decumbens* MDS 03. Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

La materia tiene orificios en el fondo para eliminar exceso de agua, la siembra fue regada diariamente con agua adecuada sin exceder especificaciones.



Gráfico 20: Siembra Brachiaria decumbens MDS 04, Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

En el gráfico 21 se observa cómo es la textura y forma del pasto después de 15 días.

Después de los quince días del muestreo y posterior siembra se toman muestras de los sustratos en tratamiento y del pasto para la cuantificación de metales y las muestras originales contaminadas también son analizadas.



Gráfico 21: Brachiaria decumbens 15 días de crecimiento, Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

15.RESULTADOS DE LABORATORIO

15.1. DENSIDAD

Volumen Cilindro: 106,44 cm³

Muestra en seco: 163,6 g

Das = Ms / Vt

Das = 163,6 g / 106,44 cm³

Das = 1,53 g / cm³

Das = Densidad aparente en seco

Ms= Masa en seco

Vt= Volumen total

Este sustrato según tablas de densidad se clasifico en la categoría de suelos con buena carga orgánica.

15.2. TEXTURA

m = 50 g

T₁ = 22 °C

t = 11:01:10

Dato hidrómetro 40 s (DH₄₀) = 10

T₂ = 22 °C

Dato hidrómetro 2 h (DH_{2h}) = 6

m = Masa

T₁ = Temperatura 1

t = Tiempo inicial

DH = Dato hidrómetro

T₂ = Temperatura 2

$$\% \text{ Arena} = 100 - \frac{((DH_{40} + \text{Corrección de } T_1) (100))}{m}$$

$$\% \text{ Arena} = 100 - \frac{((10 + 0,40) (100))}{50}$$

Arena = 79%

$$\% \text{ Arcilla} = \frac{((DH_{2h} + \text{Corrección de } T_2) (100))}{m}$$

$$\% \text{ Arcilla} = \frac{((6 + 0,40) (100))}{50}$$

Arcilla = 13%

$$\% \text{ Limo} = 100 - (\% \text{ Arcilla} + \% \text{ Arena})$$

$$\% \text{ Limo} = 100 - (13\% + 79\%)$$

Limo = 8%



Gráfico 22: Pirámide Textura, Textura del suelo, 2002

Con los porcentajes obtenidos se determina que la textura en este suelo es **ARENOSA – FRANCA**.

Con la textura hallada en laboratorio se puede determinar que la movilidad del arsénico y otros metales pesados es rápida ya que los suelos arenosos no tienen capacidad de fijación, lo que permite la lixiviación e infiltración de los contaminantes a aguas de escorrentías y subterráneas.

15.3. HUMEDAD

Muestra Húmeda (Mh) = 193,7 g

Muestra Seca (Ms) = 163,6 g

$$\% H_{BS} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

$$\% H_{BS} = \frac{193,7 \text{ g} - 163,6 \text{ g}}{163,6 \text{ g}} * 100$$

$$H_{BS} = 18,39\%$$

Con el dato obtenido en el laboratorio se deduce que el suelo tiene poca humedad debido a la clase textural y el clima de la zona. El parámetro de humedad base seca no interviene en la movilidad del arsénico.

15.4. pH Y CONDUCTIVIDAD

pH = 7,09

Conductividad = 114 $\mu\text{s} / \text{cm}$

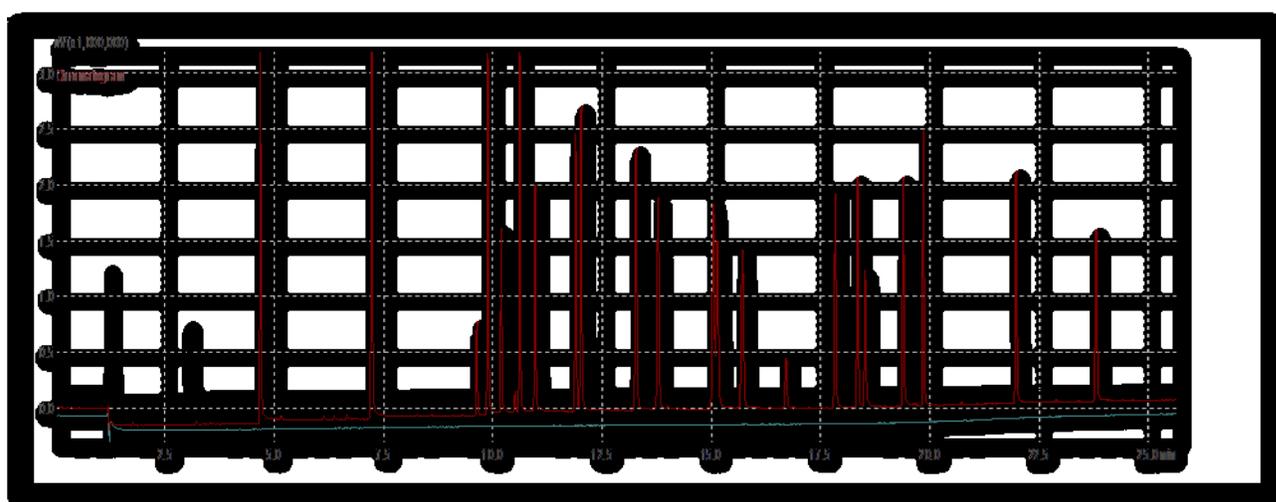
El pH, es un parámetro que define la movilidad del catión. La mayoría de los metales pesados, en general, tienen pH muy ácidos (móviles). Los elementos o compuestos con pH neutros y básicos tienden a precipitar y pH extremadamente básicos vuelven a movilizarse con la forma de aniones solubles o formando hidroxicomplejos (Se, V, As, Cr). El pH del suelo en estudio es neutro lo que demuestra movilidad baja. La conductividad representa las sales que tiene el suelo, si su conductividad es superior a 100 $\mu\text{s}/\text{cm}$, es un suelo que tiene numerosas sales, lo que hace que se caracterice por no ser muy productivo debido a que las sales se apropian del agua por procesos osmóticos, el suelo en estudio presenta este problema⁶².

15.5. ANÁLISIS CROMATOGRÁFICOS

15.5.1. Sustancias organofosforadas

15.5.1.1. Análisis Cualitativo

El análisis cualitativo se llevó a cabo por comparación de los tiempos de retención (tR) de la muestra problema con los tR de auténticos estándares cromatográficos de plaguicidas organofosforados. En el gráfico 23, se presenta la comparación entre los cromatogramas correspondientes a la muestra objeto de análisis, el blanco de proceso y el patrón de plaguicidas organofosforados.



- Estándar cromatográfico de plaguicidas organofosforados concentración 50 ppm.
- Muestra
- Blanco proceso procedimiento

Gráfico 23: Cromatograma comparativo POF: blanco, muestra y estándar cromatográfico. Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

En el Gráfico 23 se puede observar que el cromatograma correspondiente al blanco de proceso no presenta picos característicos que concuerden con plaguicidas organofosforados. Sin embargo, el cromatograma de la muestra no presentó coincidencia en tiempos de retención con ninguno de los compuestos del patrón de plaguicidas organofosforados por encima del límite de cuantificación. En la tabla 8 se presenta el resultado de la cuantificación. Los compuestos que puede determinar el método aplicado, son los siguientes:

Tabla 8: Compuestos Organofosforados

Diclorvos	Forato	Fention	Tokution
Mevinfos	Diazinon	Clorpirifos	Fensulfotion
Demeton O & S	Disulfoton	Tricloronato	Sulprofos
Etoprofos	Metil parathion	Merfos	Metil Aziinfo
Naled	Fenclorfos	Estirofos	Coumafos

Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

15.5.1.2. Análisis Cuantitativo

El análisis cuantitativo de la muestra se realizó usando el método del estándar externo, el resultado de la cuantificación se presenta en la tabla 9.

Tabla 9: Resultado de la cuantificación muestra

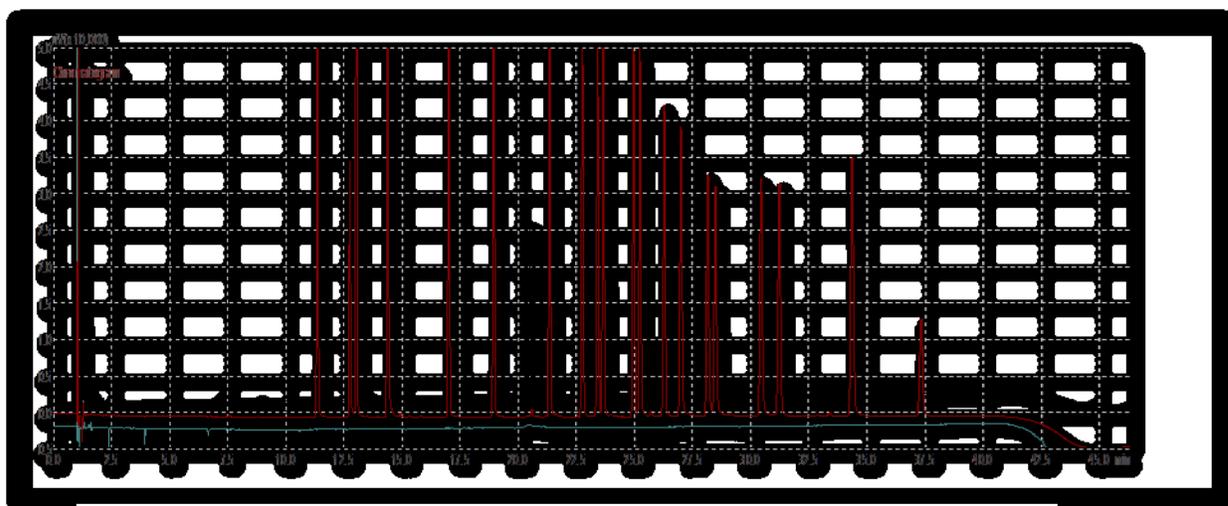
Compuesto	tR	Concentración	Unidades
POFs Totales	-	<0.0005	mg/L

Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

15.5.2. Sustancias organocloradas

15.5.2.1. Análisis Cualitativo

El análisis cualitativo se llevó a cabo por comparación de los tiempos de retención (tR) de la muestra problema con los tR de auténticos estándares cromatográficos de plaguicidas organoclorados. En el gráfico 24, se presenta la comparación entre los cromatograma correspondientes a la muestra objeto de análisis, el blanco de proceso y el estándar de plaguicidas organoclorados.



- Estándar cromatográfico de plaguicidas organoclorados concentración 0.5 ppm.
- Muestra
- Blanco de proceso (Procedimiento y reactivos. Solvente: Hexano).

Gráfico 24: Cromatograma comparativo POC: blanco, muestra y estándar cromatográfico. Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

En el Gráfico 24 se puede observar que el cromatograma correspondiente al blanco de proceso, no presenta picos característicos que concuerden con plaguicidas organoclorados. De igual forma, el cromatograma de la MUESTRA no presentó coincidencia en t_R con ninguno de los compuestos del patrón de plaguicidas organoclorados por encima del límite de cuantificación; en la tabla 10 se muestra el resultado de la cuantificación. El cromatograma de la muestra presenta picos cromatográficos con t_R diferentes a los del estándar, estos picos corresponden a compuestos para los cuales es sensible el detector de captura de electrones (*ECD*), sin embargo estos compuestos no pertenecen al grupo de los plaguicidas organoclorados y no pueden ser identificados ni cuantificados debido al alcance del método analítico. Los compuestos que puede determinar el método aplicado, son los siguientes:

Tabla 10: Compuestos Organoclorados

Alfa-BHC	Aldrín	4,4'-DDE	Endrín aldehído
Beta-BHC	Heptacloro epóxido	Diendrín	4,4'-DDT
Gama-BHC	Gama-clordano	Endrín	Endosulfán sulfato
Delta-BHC	Endosulfán I	4,4'-DDD	Metoxicloro
Heptacloro	Alfa-clordano	Endosulfán II	Endrín cetona

Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

15.5.2.2. Análisis Cuantitativo

El análisis cuantitativo de la muestra se llevó a cabo usando el método del estándar externo, el resultado de la cuantificación se presenta en la tabla 11.

Tabla 11: Resultado de la cuantificación muestra

Compuesto	t _R	Concentración	Unidades
POCs Totales	-	<0.0001	mg/L

Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

Según los resultados de cromatografía el suelo no presenta organoclorados ni organofosforados, ya que estos se lixivian quedando en niveles inferiores, otros se volatilizan y algunos compuestos se desplazan en las aguas superficiales o de riego incrementando los problemas de salud debido a la alta toxicidad de las sustancias.

15.6. RESULTADOS METALES PESADOS

$$m = 0,5 \text{ g}$$

$$m = \text{Masa}$$

$$V = 100 \text{ ml}$$

$$V = \text{Volumen}$$

$$\text{Concentración metal} = 0,052 \text{ mg / L As}$$

$$0.052 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \frac{0,1 \text{ L}}{0,5 \text{ g}} * \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ Kg}} = \mathbf{10,4 \text{ mg / Kg}}$$

La norma Internacional Louisiana adoptada por Colombia deja como límite para el Arsénico 10 mg/Kg en el suelo.

Tabla 12: Cuantificación de Metales en suelos agrícolas del Espinal, 2013

RESULTADOS DE METALES	
Metal	Unidades (mg / Kg)
Fe	15960
Mn	458
Mg	2800
Zn	178
Na	850
Ca	322
Cd	1,2
Cu	36
Cr	28
As	10,4
Hg	<0,4
Ni	40
Pb	24
Ag	<10

Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

Según análisis se reportaron concentraciones de algunos metales, tales como el arsénico lo que demuestra que el suelo se encuentra contaminado (Norma Internacional Louisiana, adoptada por Colombia) con este metal, debido a la exposición del mismo durante la fumigación del cultivo de arroz. El arsénico se lixivia llegando a las aguas subterráneas y superficiales utilizadas en esta parte del país para consumo humano lo cual genera un problema de salubridad. A continuación se muestran parámetros físico-químicos de aguas subterráneas ubicadas cerca al cultivo de arroz (anexo 2, Mapa Espinal, puntos de muestreo).

15.7. CONSOLIDACIÓN RESULTADOS LABORATORIO

Tabla 13: Resultados laboratorio muestra de suelo

PARÁMETRO	RESULTADO	MÉTODO
Densidad aparente en seco	1,53 g/cm ³	IGAC 2006, Sexta Edición
Textura	Arena: 79%	Bouyoucos
	Arcilla: 13%	
	Limo: 8%	
Humedad base seca	18,39%	IGAC 2006, Sexta Edición
pH	7,09	IGAC 2006, Sexta Edición
Conductividad	114 µs/cm	IGAC 2006, Sexta Edición
POF's Y POC's	<0,0001	Detector FID
Arsénico (Lectura)	0,052 mg/kg	SM 3114C

Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

15.8. RESULTADOS ANÁLISIS AGUA SUBTERRÁNEA

Tabla 14: Cuantificación parámetros agua subterránea

PARAMETROS FISICO-QUIMICOS AGUA SUBTERRANEA				
Fecha	Parámetro	pH	Conductividad (µs / cm)	Arsénico (mg / L) As
Semana 4	Muestra 1	7,12	1034	0,069
Semana 4	Muestra 2	7,04	614	0,047
Semana 4	Muestra 3	7,08	826	0,054
	Resolución 2115	6,5 - 9,0	N/A	0,010

Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

Muestra 1: Tomada en Agosto 8 de 2013. Pozo finca la Reforma. Vereda Guasimal. Coordenadas 905064,806 – 948522,164.

Muestra 2: Tomada en Agosto 8 de 2013. Pozo finca el Palmar. Vereda el Guasimal. Coordenadas 904916,375 – 948462,633.

Muestra 3: Tomada en Agosto 8 de 2013. Pozo finca el Comején. Vereda el Guasimal. Coordenadas 905137,832 – 948281,657.



Gráfico 25: Pozo finca la Reforma, Muestra 1. Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013



Gráfico 26: Pozo finca el Palmar, Muestra 2. Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013



Gráfico 27: Pozo finca el Comején, Muestra 3. Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

La tabla 14 describe que las muestras de agua tomadas de los pozos presentan analitos de arsénico en concentraciones altas comparada con la resolución 2115 de agua potable, lo que no la hace apta para el consumo humano, la conductividad expresa sales que están un poco elevadas, por el contrario el pH presenta lectura neutra y apta para el consumo.

Los gráficos 25, 26 y 27 corresponden a cada uno de los pozos de los cuales se tomó la muestra para ser analizada

16.PROCEDIMIENTO EN LABORATORIO, ESPECÍFICO PARA DETECTAR PRESENCIA DE ARSÉNICO

16.1. DETERMINACIÓN DE ARSÉNICO



Gráfico 28: Preparación muestra cuantificación Arsénico, Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013



Gráfico 29: Análisis de arsénico con muestra tamizada, Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

En la tabla 15 se relacionan las concentraciones de Arsénico obtenidas en laboratorio de cada una de las muestras.

Tabla 15: Resultados muestras de suelos

MDS No.	METAL	M ₁ (mg/kg)	M ₂ (mg/kg)	M ₃ (mg/kg)
2	As	10,2	6,8	3,7
3	As	8,6	5,7	3,1
4	As	10,4	6,4	4,1

Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

M₁= Muestra del suelo tomada el 8 de Agosto de 2013

M₂= Muestra del suelo en tratamiento tomada 15 días después del muestreo.

M₃= Muestra tomada del forraje del pasto 15 días después del muestreo.

MDS= Muestra de suelo

17.GRÁFICAS EFICIENCIA DE LA FITORREMEDIACIÓN

17.1. MDS 2:

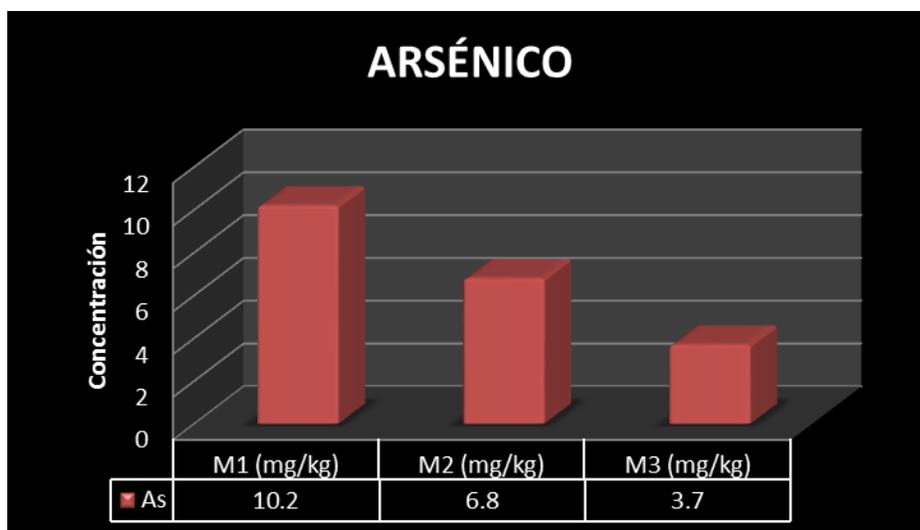


Gráfico 30: Comparación nivel de descontaminación en muestra 2, Autores, 2013

El comportamiento de la siembra uno (MDS 2) se reflejó en el anterior gráfico, donde se encuentra un porcentaje de remoción del 33,3% en el suelo en tratamiento continuo un 66 % del contaminante estos datos son en los primeros 15 días de tratamiento.

17.2. MDS 3:

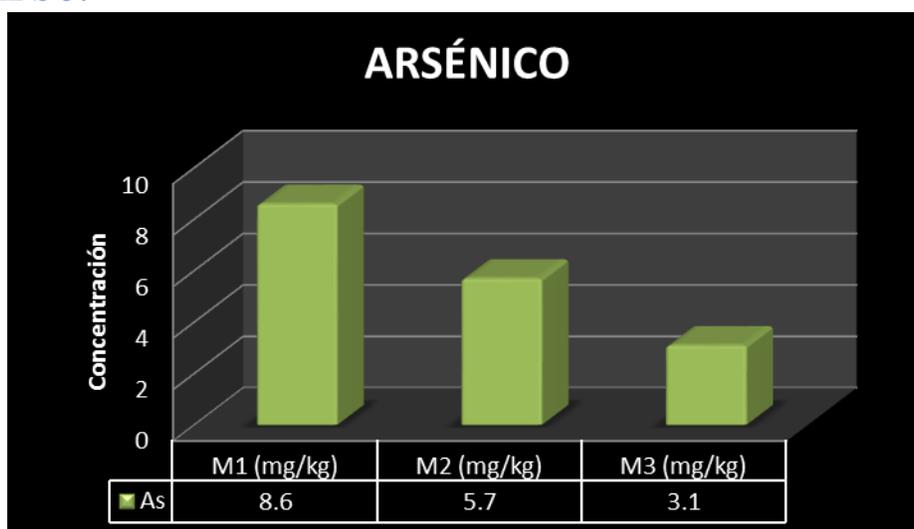


Gráfico 31: Comparación nivel de descontaminación en muestra 3, Autores, 2013

En la siembra dos (MDS 3) el porcentaje de remoción es del 33,7% hasta el día 15 de tratamiento.

17.3. MDS 4:

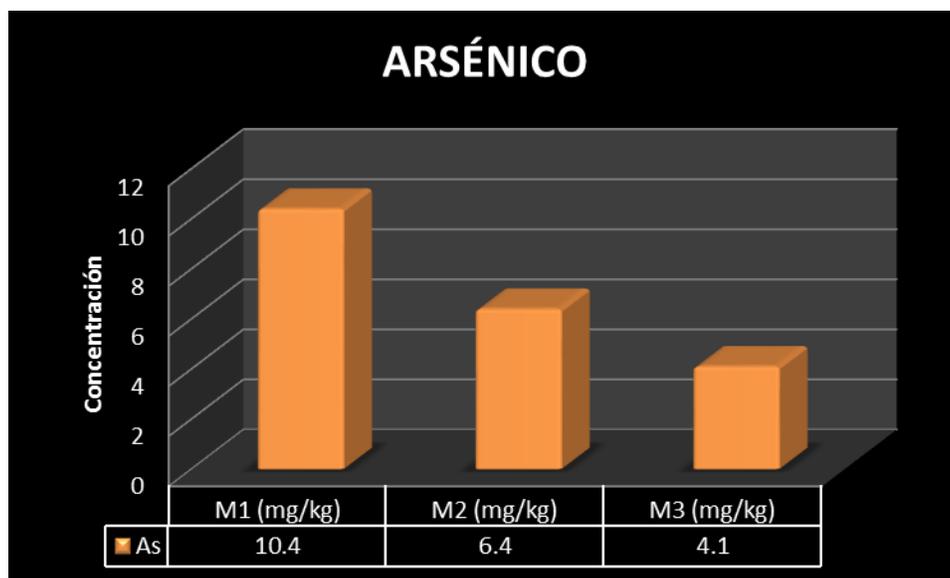


Gráfico 32: Comparación nivel de descontaminación en muestra 4, Autores, 2013

En la siembra tres (MDS 4) se encuentra un porcentaje de eficiencia del 38,5% en quince días de tratamiento con la *Brachiaria decumbens*, los resultados hasta este punto son similares entre si y demuestran eficacia la fitorremediación, confirman la validez para el tratamiento de suelos contaminados con arsénico.

El análisis del sustrato en tratamiento y del forraje de la *Brachiaria decumbens* continua durante un periodo de tiempo hasta de 100 días después de sembrado el pasto, con análisis intermedios para observar el comportamiento de descontaminación del sustrato.

18.RESULTADOS FINALES DE LA FITORREMEDIACIÓN

El estudio de la plantación de *Brachiaria decumbens* se desarrolla en un periodo de 100 días, con análisis periódicos de arsénico a cada una de las siembras, los siguientes son los resultados desde el día 0 hasta el día 100.

Tabla 16: Resultados siembra 1

SIEMBRA 1 (MDS 2)			
TIEMPO (día)	METAL	M₂ (mg/kg)	M₃ (mg/kg)
0	As	10,2	0
15	As	6,8	3,7
30	As	4,3	5,6
60	As	2,3	7,7
90	As	2,0	7,8
100	As	2,0	7,8

Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

Tabla 17: Resultados siembra 2

SIEMBRA 2 (MDS 3)			
TIEMPO (día)	METAL	M₂ (mg/kg)	M₃ (mg/kg)
0	As	8,6	0
15	As	5,7	3,1
30	As	3,4	5,0
60	As	1,9	6,4
90	As	1,7	6,6
100	As	1,6	6,6

Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

Tabla 18: Resultados siembra 3

SIEMBRA 3 (MDS 4)			
TIEMPO (día)	METAL	M₂ (mg/kg)	M₃ (mg/kg)
0	As	10,4	0
15	As	6,4	4,1
30	As	4,1	6,1
60	As	2,9	7,3
90	As	2,3	7,7
100	As	2,1	8,0

Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

M₂ = Muestra del suelo en tratamiento.

M₃ = Muestra tomada del forraje del pasto.

MDS = Muestra de suelo.

19.GRÁFICAS DE COMPORTAMIENTO

En las siguientes gráficas se observa el comportamiento de los suelos en tratamiento y el forraje de la *Brachiaria* en cada una de las plantaciones durante cien días.

19.1. SIEMBRA 1

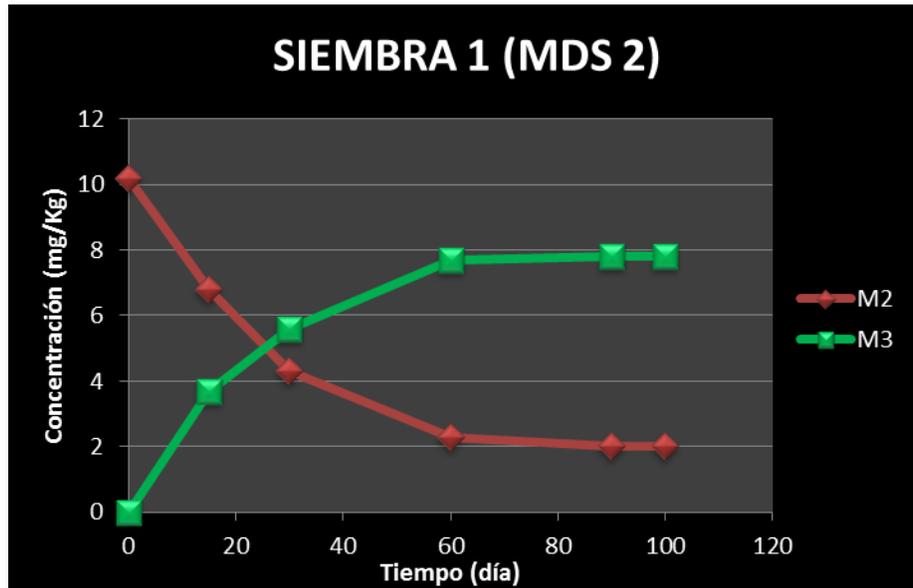


Gráfico 33: Comparación nivel de descontaminación en siembra 1, Autores, 2013

19.2. SIEMBRA 2

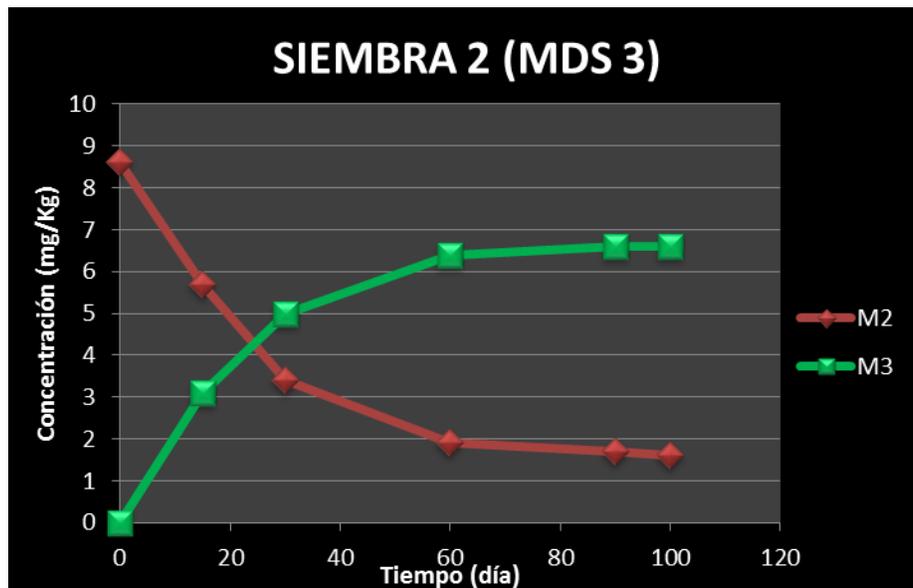


Gráfico 34: Comparación nivel de descontaminación en siembra 2, Autores, 2013

19.3. SIEMBRA 3

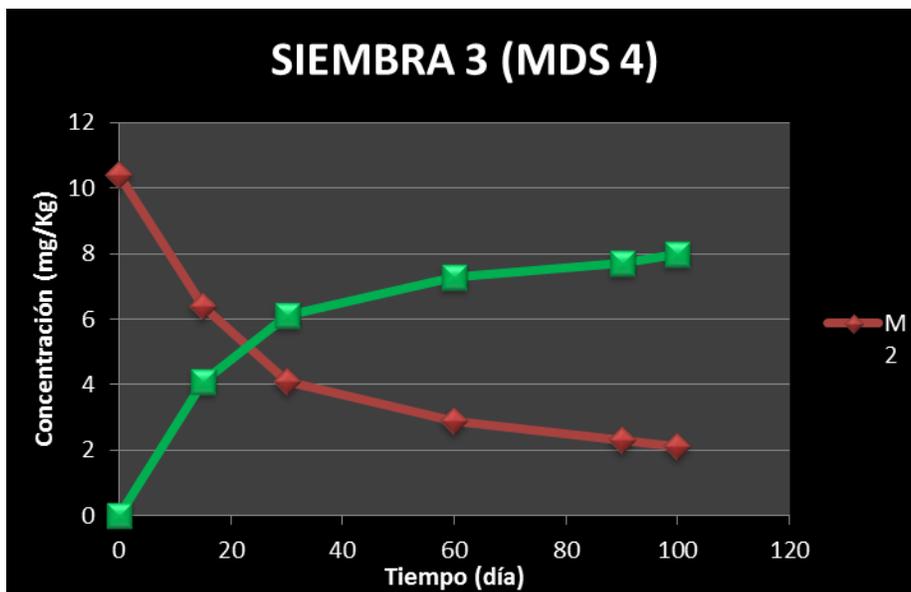
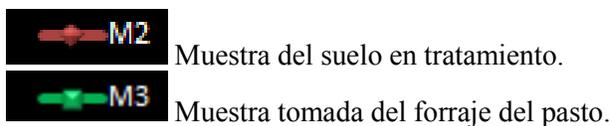


Gráfico 35: Comparación nivel de descontaminación en siembra 3, Autores, 2013



En los anteriores gráficos se observa el comportamiento de cada una de las siembras evaluadas durante el desarrollo del proyecto. Se evidencia que la fitorremediación es eficiente durante el periodo de tiempo evaluado, en los primeros quince días los niveles de descontaminación son buenos, ya que el pasto en su estado más joven acumula el arsénico en su interior de una forma rápida, pasados los 30 días los niveles de contaminación en el sustrato en tratamiento han disminuido alrededor de un 60% en las tres siembras. Pasado los 60 días el porcentaje de remoción de las tres plantaciones es alrededor de un 77%, transcurridos los 90 días el porcentaje es cercano al 80%, transcurridos los 100 días los resultados son muy similares a los 90 días siendo un periodo de tiempo en el cual la acumulación del arsénico no es significativa ya que el pasto comienza su estado maduro y la acumulación del metal es lenta.

Los porcentajes de remoción del suelo son alrededor del 80% en las plantaciones siendo una descontaminación significativa y eficiente ya que las concentraciones del metal llegan a niveles que no se consideran como peligrosas en el sustrato.

20. BALANCE DE MASA EN LA FITORREMEDIACIÓN

20.1. DIAGRAMA DE PROCESO

20.1.1. Proceso inicial: Se refiere al funcionamiento del sistema antes del análisis del proceso (fitorremediación).



Gráfico 36: Proceso inicial, Autores, 2013

20.1.2. Análisis del proceso

Se refiere a la evaluación del proceso que se tiene en cuenta en el estudio.



Gráfico 37: Análisis del proceso, Autores, 2013

20.1.3. Análisis del proceso

Ecuación de Balance de masa y energía

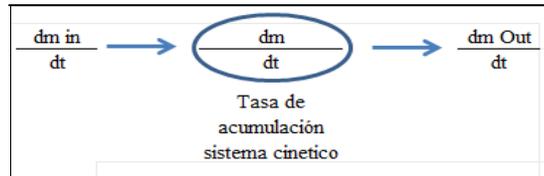


Gráfico 38: Ecuación de balance, Autores, 2013

$$\frac{dm}{dt} = \frac{dm \text{ in}}{dt} - \frac{dm \text{ Out}}{dt} + r * v$$

$$r = \frac{dC}{dt} = -k * C^n$$

k = Constante cinética

C = Concentración contaminante

dm/dt = Tasa de acumulación

r = velocidad de reacción cinética

$C = C_0 * e^{-k*t}$

20.1.4. Tratamiento del sustrato

En la siguiente tabla se encuentra la concentración de arsénico presente en el sustrato en tratamiento analizada en laboratorio a diferentes días de comenzada la fitorremediación. Para el análisis de balance de masa se utilizó los datos de la siembra 1, debido a que las tres plantaciones tuvieron comportamientos similares durante todo el proceso de descontaminación de arsénico.

Tabla 19: Comportamiento del suelo

t (días)	C (mg/Kg de As)
0	10,2
15	6,8
30	4,3
60	2,3
90	2,0
100	2,0

Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

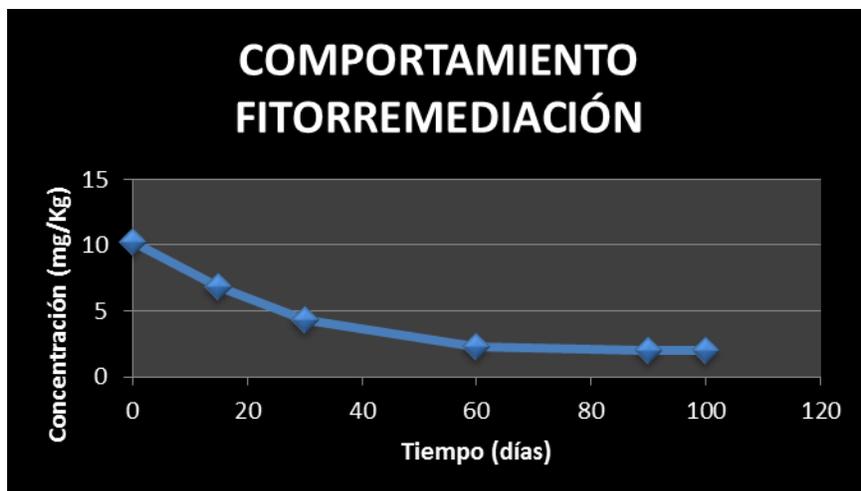


Gráfico 39: Análisis del proceso, Autores, 2013

Para hallar la constante cinética de la fitorremediación se tiene en cuenta la siguiente tabla:

Tabla 20: Constante cinética.

t (días)	C (mg/Kg)	C/Co	-Ln (C/Co)
0	10,2	1	0
15	6,8	0,66	0,41
30	4,3	0,42	0,87
60	2,3	0,22	1,51
90	2,0	0,19	1,66
100	2,0	0,19	1,66

Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

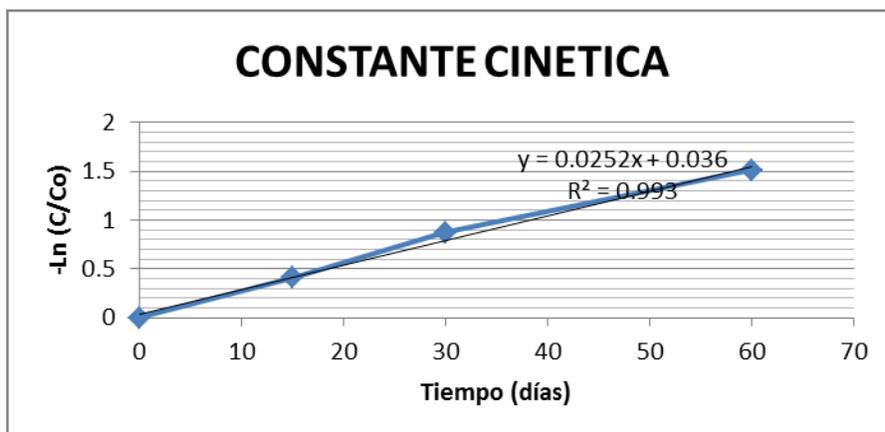


Gráfico 40: Constante cinética, Autores, 2013

$$m = k$$

$$m = \frac{y}{x}$$

$$m_{15} = \frac{0,41}{15} = 0,03$$

$$m_{30} = \frac{0,87}{30} = 0,03$$

$$m_{60} = \frac{1,51}{60} = 0,03$$

$$k = 0,03 \text{ dias}^{-1}$$

La eficiencia de la fitorremediación a los 60 días es de:

$$\% E = \frac{C_0 - C}{C_0} * 100$$

$$\% E = \frac{10,2 - 2,3}{10,2} * 100$$

$$\% E = 77,45\%$$

21.DISTRIBUCIÓN EN LA *Brachiaria decumbens* DE LA CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO

Se realizó la separación de la planta en dos: raíz y demás partes de la *Brachiaria* (tallo y hoja) después del día 100, para hacer la respectiva cuantificación y determinar en qué parte de la planta se acumula el metal. Los datos obtenidos se pueden visualizar en la siguiente tabla.

Tabla 21: Cuantificación de Arsénico de la *Brachiaria decumbens* del suelo en tratamiento

RESULTADOS As (mg/Kg)			
MDS No	CONCENTRACIÓN INICIAL PLANTA	RAIZ	TALLO Y HOJA
2	7,8	7,4	<1,2
3	6,6	6,3	<1,2
4	8,0	7,1	<1,2

Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

La concentración en el tallo y hojas es baja y se encuentra por debajo de los límites de detección del análisis, lo cual indica que exceptuando la raíz la planta no constituye un riesgo toxicológico para los animales que puedan ingerirla. Por el contrario la raíz acumula la mayor parte del metal y se debe disponer como un residuo peligroso al cual se le debe dar un manejo adecuado.

21.1. ANÁLISIS DE LA SEMILLA



Gráfico 41: Semilla de *Brachiaria*, Autores, 2013

Como control de calidad se le determino arsénico a la semilla de la *Brachiaria*, se realizó la digestión y determinación de metales después de un proceso de maceración y tamizado, con el fin de descartar la posible contaminación de la semilla. De ese análisis se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 22: Cuantificación de Arsénico en la semilla de Brachiaria decumbens

RESULTADO EN LA SEMILLA	
METAL	Concentración (mg/Kg)
As	<1,2

Proyecto práctica investigativa, Autores, 2013

Con el resultado obtenido se puede garantizar que la semilla no presenta concentración de arsénico o es muy baja y está por debajo del límite de detección del análisis. (Norma Internacional Louisiana, adoptada por Colombia).

22.DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En los primeros quince días los niveles de descontaminación son buenos, ya que el pasto en su estado más joven acumula el arsénico en su interior de una forma rápida, pasados los 30 días los niveles de contaminación en el sustrato en tratamiento han disminuido alrededor de un 60% en las tres siembras. Pasado los 60 días el porcentaje de remoción de las tres plantaciones es alrededor de un 77%, transcurridos los 90 días el porcentaje es cercano al 80%, transcurridos los 100 días los resultados son muy similares a los 90 días siendo un periodo de tiempo en el cual la acumulación del arsénico no es significativa ya que el pasto comienza su estado maduro y la acumulación del metal es lenta.

Los porcentajes de remoción del suelo son alrededor del 80% en las plantaciones siendo una descontaminación significativa y eficiente ya que las concentraciones del metal llegan a niveles que no se consideran como peligrosas en el sustrato.

La concentración en el tallo y hojas es baja y se encuentra por debajo de los límites de detección del análisis, lo cual indica que exceptuando la raíz la planta no constituye un riesgo toxicológico para los animales que puedan ingerirla. Por el contrario la raíz acumula la mayor parte del metal y se debe disponer como un residuo peligroso al cual se le debe dar un manejo adecuado.

23.CONCLUSIONES

Con el proyecto realizado se observó una disminución en la concentración de arsénico y se comprobó por medio de los ensayos efectuados la eficiencia de la *Brachiaria decumbens* como acumuladora de iones metálicos en su raíz. Las pruebas demostraron mayor eficiencia durante los primeros días, momento en el cual la planta se encuentra en crecimiento. Se comprobó que la gramínea es eficiente y que su comportamiento es destacable en un suelo con alta concentración del metal.

La eficiencia de la *Brachiaria decumbens* en el proyecto de fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados, se demostró con los datos obtenidos en laboratorio y el trabajo hecho en campo, además se apoyó con estudios realizados en otras zonas del país y del mundo en los cuales ya se había trabajado con la planta obteniendo óptimos resultados. Con el desarrollo de este proyecto se identificaron problemas reales que abordan pueblos y ciudades de Colombia, con la biorremediación se pueden mitigar los daños ocasionados al suelo y a los cuerpos de agua que están siendo afectados con metales pesados como el arsénico que causan graves y mortales consecuencias para los humanos y demás especies. Los suelos arenosos no poseen la capacidad para fijar los metales pesados, los cuales pueden pasar rápidamente al subsuelo y pueden contaminar los niveles freáticos.

Las normas creadas para cuidar el ambiente (agua, suelo, aire) están estipuladas pero no contribuyen con la identificación de problemas y su adecuada solución. La evidencia se encuentra con el análisis de agua realizado en el laboratorio, en donde se demuestra que los habitantes de la vereda Guasimal y alrededores consumen agua contaminada perjudicando su salud, además no existe el control respecto a la utilización de los agroquímicos y los residuos generados por estos, que no son manejados de manera acorde y por el contrario de mejorar incrementan la contaminación del suelo y agua de la zona.

24.RECOMENDACIONES

Con el análisis realizado en los segmentos de la gramínea, se lograron caracterizar las partes en las que se concentran los metales absorbidos del suelo, encontrando que dichos elementos se acumulan en la raíz. Conociendo la ubicación de las concentraciones, se sugiere que la parte de la *Brachiaria* que sobresale del sustrato (hojas) pueda ser consumida por el ganado como los bovinos, equinos, ovinos, entre otros, sin que el pasto represente peligro para el animal y de esta manera se disminuya la posibilidad de que se transmitan enfermedades de salud pública a los consumidores de productos lácteos o cárnicos. Con la raíz se puede hacer otro tipo de tratamiento, como la incineración, la cual no es muy viable ya que puede generar sub-productos contaminantes a la atmosfera como los óxidos de arsénico. Otra alternativa se basa en utilizar la raíz con ayuda de la formación de sales y procesos de electrolisis, para hacer la extracción de las concentraciones de los metales y utilizarlos en procesos industriales. También se puede utilizar el material orgánico en baldosas después de hacer procesos de inhibición. Se debe prohibir el consumo de agua de los pozos y se les debe hacer una caracterización completa para identificar otros posibles contaminantes.

El proyecto puede contribuir con la descontaminación de las aguas subterráneas y de escorrentía ya que al disminuir las concentraciones de los metales en el suelo, la movilización de estos en las aguas crudas se disminuye. La creación de un acueducto local para la comunidad, la implementación de pequeñas plantas de tratamiento de agua, son opciones para mejorar la calidad de vida de los habitantes de la comunidad rural.

La ejecución de jornadas de educación ambiental para aprender a manejar los residuos de los agroquímicos y disminuir el uso de los mismos, optando por utilizar otras alternativas para combatir las plagas de los cultivos, son proyectos dirigidos a mitigar impactos ambientales futuros.

25. BIBLIOGRAFÍA

1. BY DOUGLAS A. SKOOG, DONALD M. WEST, F. JAMES HOLLE. Fundamentos de química analítica, Volumen 2. (1997). Editorial Reverte. Pag 623. Disponible en : http://books.google.com.co/books?id=CU7yWvK1kGQC&pg=PA623&dq=que+es+la+espectrofotometr%C3%ADa+de+ab+atomica&hl=es-419&sa=X&ei=dmtuU6_oNtLmsASSti4CYCw&ved=0CDYQ6AEwAQ#v=onepage&q=que%20es%20la%20espectrofotometr%C3%ADa%20de%20ab%20atomica&f=false. Recuperado el 6 de marzo de 2013.
2. BY TOMÁS D. ARIAS. Glosario de medicamentos: desarrollo, evaluación y uso, (1999). Editorial Pan American Health Org. Pag 03. Disponible en: http://books.google.com.co/books?id=x_jv0LZeJ0cC&pg=PA1&dq=%09Absorci%C3%B3n.&hl=es-419&sa=X&ei=VW1uU6iDF8vgsATcloGgCw&ved=0CEMQ6AEwBA#v=onepage&q=%09Absorci%C3%B3n%3A&f=false. Recuperado el 06 de marzo de 2013.
3. BY RUDOLPH MACY. Química orgánica simplificada. (1976). Editorial Reverte. Pag 299. Disponible en: <http://books.google.com.co/books?id=QrvzEPZU2ygC&pg=PA299&dq=%09%C3%81cido+org%C3%A1nico&hl=es-419&sa=X&ei=HG9uU-7dKcLhsASg34K4BQ&ved=0CDQQ6AEwAQ#v=onepage&q=%09%C3%81cido%20org%C3%A1nico&f=false>. Recuperado el 10 de marzo de 2013.
4. BY J M COSTA. DICCIONARIO DE QUÍMICA FÍSICA (2005). Editorial Ediciones Díaz de Santos. Pag 11. Disponible en: http://books.google.com.co/books?id=9_7xnVy4GzsC&pg=PA11&dq=%09Adsorci%C3%B3n&hl=es-419&sa=X&ei=LXBUU537DonfsATNIYHACw&ved=0CCwQ6AEwAA#v=onepage&q=%09Adsorci%C3%B3n&f=false. Recuperado el 19 de marzo de 2013.
5. EDUARDO GONZÁLEZ JIMÉNEZ. Proyecto estrategia regional de biodiversidad para los países del trópico andino (2002). Disponible en: <http://www.comunidadandina.org/desarrollo/te3.PDF>. Recuperado el 11 de marzo de 2013.
6. BY MADEREY RASCON, LAURA ELENA, JIMENEZ ROMAN. Principios de Hidrogeografía. Estudio Del Ciclo Hidrológico (2005) Editorial UNAM. Pag 87. Disponible en: <http://books.google.com.co/books?id=0S3XDWsDzSAC&pg=PA87&dq=->

- [%09definicion+de+Agua+Subterr%C3%A1nea&hl=es-419&sa=X&ei=Q3NuU6y6E-bNsQTmn4LgDQ&ved=0CCwQ6AEwAA#v=onepage&q=-%09definicion%20de%20Agua%20Subterr%C3%A1nea&f=false](#). Recuperado el 15 de marzo de 2013.
7. BY JOSÉ MARÍA TEIJÓN RIVERA. Bioquímica estructural (2001). Editorial tebar. Pag 53. Disponible en: <http://books.google.com.co/books?id=BPOTvYykwfAC&pg=PA53&dq=definicion+de++Amino%C3%A1cido&hl=es-419&sa=X&ei=gHRuU-iwIam-sQSYzIDwAg&ved=0CCwQ6AEwAA#v=onepage&q=definicion%20de%20%20Amino%C3%A1cido&f=false>. Recuperado el 11 de marzo de 2013.
 8. ERNST CASSIRER. Antropología filosófica (1967). Disponible en: http://blogs.enap.unam.mx/asignatura/jorge_flores/wp-content/uploads/2011/08/Ernst-Cassirer.pdf. Recuperado el 08 de abril de 2013.
 9. ANA MARÍA CONTENTO SALCEDO. Nuevos métodos fotométricos y cromatográficos (1997). Editorial Amazon. Pag 84. Disponible en: <http://books.google.com.co/books?id=4MjWEFlpEZ0C&pg=PA84&dq=definicion+de+analito&hl=es-419&sa=X&ei=cHduU6GoHK7QsQTMk4DQCw&ved=0CDEQ6AEwAQ#v=onepage&q=definicion%20de%20analito&f=false>. Recuperado el 11 de abril de 2013.
 10. CARLOS MACAYA MIGUEL. Libro de la salud cardiovascular del Hospital Clínico San Carlos (2009). Editorial Fundación BBVA Pag 631. Disponible en: http://books.google.com.co/books?id=O2XEpDdesrAC&pg=PA631&dq=El+ars%C3%A9nico+es+un+elemento+y+un+mineral+que+se+encuentra+distribuido+ampliamente+en+el+ambiente&hl=es-419&sa=X&ei=cnhuU4_IBO_ksAS-x4DIDA&ved=0CCwQ6AEwAA#v=onepage&q=El%20ars%C3%A9nico%20es%20un%20elemento%20y%20un%20mineral%20que%20se%20encuentra%20distribuido%20ampliamente%20en%20el%20ambiente&f=false. Recuperado el 11 de abril de 2013.
 11. ERIKA DESARROLLO. Conceptos (2010). Disponible en: <http://erikadesarrollosustentable.blogspot.com/2010/12/conceptos.html>. Recuperado el 10 de mayo de 2013.
 12. SECRETARIA DEL MEDIO AMBIENTE. propiedades edáficas y calidad de sitio de áreas reforestadas en la sierra de guadalupe, distrito federal (2004). Disponible en:

- <http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/archivos/propiedades%20 edaficas areas refor estadas sierra guadalupe df.pdf>. Recuperado el 11 de mayo de 2013.
13. MASTER AMBIENTAL, Glosario.net (2007). Disponible en: <http://ciencia.glosario.net/medio-ambiente-acuatico/bioacumulaci%F3n-10260.html>. Recuperado el 04 de marzo de 2013.
 14. UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA URUGUAY. Glosario (2007). Disponible en: <http://www.greenfacts.org/es/glosario/abc/biomagnificacion.htm>. Recuperado el 12 de mayo de 2013.
 15. BIOTECNOLOGIA AMBIENTAL. (2009). Disponible en: <http://biotecnologiaequipo5.blogspot.com/p/puto-chavarria-corrige-esto-xq-aki-va.html>. Recuperado el 12 de marzo de 2013.
 16. ECURED. Características de botánica (2004). Disponible en: <http://www.ecured.cu/index.php/Brachiaria>. Recuperado el 12 de mayo de 2013.
 17. PUBLICACIONES INCAP MDE-025. Plaguicidas de tipo organofosforados y carbamatos. (2002). Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/eco/034059/034059-03.pdf>. Recuperado el 04 de mayo de 2013.
 18. ROBERT THORNTON MORRISON, ROBERT NEILSON BOYD. Química orgánica (1998). Editorial Reverte. Pag 480. Disponible en: http://books.google.com.co/books?id=N0kLiQ-fnjgC&pg=PA480&dq=%09Compuesto+arom%C3%A1tico:&hl=es-419&sa=X&ei=qIhuU_bOG-ajsQSShgE&ved=0CCwQ6AEwAA#v=onepage&q=%09Compuesto%20arom%C3%A1tico%3A&f=false. Recuperado el 12 de abril de 2013.
 19. RAMÓN SANS FONFRÍA, JOAN DE PABLO RIBAS. Ingeniería ambiental: contaminación y tratamientos (1989). Editorial Marcombo. Disponible en: <http://books.google.com.co/books?id=kumplOJs6T0C&printsec=frontcover&dq=%09Contaminaci%C3%B3n:&hl=es-419&sa=X&ei=r4luU86PGfPNsQS8ioKYCg&ved=0CDEQ6AEwAQ#v=onepage&q=%09Contaminaci%C3%B3n%3A&f=false>. Recuperado el 13 de marzo de 2013.
 20. HERBERT A. LAITINEN, WALTER E. HARRIS. Análisis químico: texto avanzado y de referencia (1982). Editorial Reverte. Pag 182. Disponible en: <http://books.google.com.co/books?id=VMB2E281nPUC&pg=PA173&dq=%09Coprecipitado&hl=es-419&sa=X&ei= opuU9aBLa->

[zsAT3woDoAg&ved=0CDYQ6AEwAg#v=onepage&q=-%09Coprocesado&f=false](http://books.google.com.co/books?id=O1pZAAAAMAAJ&q=-%09Coprocesado&ved=0CDYQ6AEwAg#v=onepage&q=-%09Coprocesado&f=false).

Recuperado el 12 de junio de 2013.

21. CARLOS LLANO CIFUENTES. Etiología de la idea de la Nada (2004). Disponible en: <http://books.google.com.co/books?id=O1pZAAAAMAAJ&q=-%09Etiolog%C3%ADa&dq=-%09Etiolog%C3%ADa&hl=es-419&sa=X&ei=VYxuU7qpA-LLsQT-wYC4Cw&ved=0CDIQ6AEwAQ>. Recuperado el 23 de marzo de 2013.
22. REVISTA COSTARRICENSE DE CIENCIAS MÉDICAS. El oxígeno: molécula esencial y causa de envejecimiento (2000). Disponible en: http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0253-29482000000200007&script=sci_arttext. Recuperado el 12 de mayo de 2013.
23. COSTA, CERVERA, CUNILL, ESPLUGAS, MANS, MATA. Curso de ingeniería química: introducción a los procesos, las operaciones unitarias y los fenómenos de transporte (1991). Editorial Reverté S.A. Pág 47. Disponible en: http://books.google.com.co/books?id=XZNYpvno_V8C&pg=PA47&lpg=PA47&dq=desorcion+definicion+quimica&source=bl&ots=TuUudBKVMh&sig=xpx1fgZ4N6dQvE3dda1JORfzV6Y&hl=es&sa=X&ei=ewl4U8-3KMKZqAa97YCYCA&ved=0CDcQ6AEwAg#v=onepage&q=desorcion%20definicion%20quimica&f=false. Recuperado el 14 de Septiembre de 2013.
24. MESA, BARROS, MEDINA. Metilación del ADN (2006). Disponible: http://www.imbiomed.com.mx/1/1/articulos.php?method=showDetail&id_revista=48&id_seccion=220&id_ejemplar=3610&id_articulo=35050. Recuperado el 24 de Agosto de 2013.
25. UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE. Manual para el reconocimiento de suelos (2003). Disponible: <http://www.uach.cl/labsuelosforestales/msuelos.htm>. Recuperado el 27 de Marzo de 2013.
26. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO. Limpieza y conformación del conducto radicular (2008). Disponible en: <http://www.iztacala.unam.mx/rivas/NOTAS/Notas11Limpieza/irruelantes.html>. Recuperado el 16 de Julio de 2013.
27. OLIVER C. Transformación de Patrones de Resonancia (2009). Disponible en: <http://www.patronesderesonancia.org/definicion%20de%20la%20resonancia.html>. Recuperado el 14 de Junio de 2013.

28. VICUÑA G. Transporte de Solutos y Fotoasimilados. Disponible en: <http://www1.ub.edu/fvd4/wq/wqf/DadesWQF/Transporte%20de%20Solutos.pdf>. Recuperado el 22 de Abril de 2013.
29. EKOREPEL S.A. Gestión de suelos contaminados. Disponible en: <http://www.respel.cl/ResiduosPeligrosos/index.php/suelos-contaminados-con-metales-pesados>. Recuperado el 25 de Septiembre de 2013.
30. BIOQUIMICA AMBIENTAL. Introducción a la bioquímica ambiental. Disponible en: http://www2.uah.es/tejedor_bio/bioquimica_ambiental/T2.htm. Recuperado el 14 de Mayo de 2013.
31. PUENTE J. Venenos en el Hogar. Editorial Universidad Santo Tomás, 2006, Disponible en: <http://books.google.com.co/books?id=YadMP-60piMC&pg=PA97&dq=agroquimicos+mortales&hl=en&sa=X&ei=0F7IUvfOF9LLkQfvIGYBA&ved=0CDUQ6AAEwA#v=onepage&q=agroquimicos%20mortales&f=false>. Recuperado el 21 de Enero de 2013.
32. ALFÉREZ J, ARAIZA J Y JÁUREGUI J. Captación de arsénico por cultivos de raíces in vitro de *Lycopersicon Esculentum*, un modelo de fitorremediación. Disponible en: www.uaemex.mx/Red_Ambientales/docs/congresos/.../TBA005.doc. Recuperado el 5 de febrero de 2013.
33. BERNAL M, CLEMENTE S, VASQUEZ S, WALKER D. Aplicación de la fitorremediación a los suelos contaminados por metales pesados en Aznalcóllar. Revista Ecosistemas 16 Vol.2. Mayo 2007. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/540/54016208.pdf>. Recuperado el 12 de enero de 2013.
34. LÓPEZ A, RAMIREZ C, GARCÍA F, IBARRA J, SANDOVAL O. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. Trop. subtrop. agroecosyt vol.14 no.2 Mérida may./ago. 2011. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-04622011000200002&script=sci_arttext. Recuperado el 16 de marzo de 2013.
35. SOLANO A. Movilización de metales pesados en residuos y suelos industriales afectados por la hidrometalurgia del zinc Estudio de la movilización de metales pesados. Capítulo VIII. Disponible en: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/11036/Tasm11de16.pdf?sequence=11>. Recuperado 23 de Febrero de 2013.

36. MULAS R. Fitorremediación de suelos. Universidad de Valladolid. Disponible en: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/IQM_fitorremediacion_Valladolid_25615.pdf. Recuperado el 5 de febrero de 2013.
37. MORENO E. Recuperación de suelos mineros contaminados con arsénico mediante fitotecnologías. 2010. Disponible en: http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/emjimene/Publicaciones/PhD_Thesis_EMorenoHQ.pdf. Recuperado el 15 de febrero de 2013.
38. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Dirección de ecosistemas. Legislación del Recurso Suelo en Colombia. Abril de 2003. Disponible en: http://www.minambiente.gov.co/documentos/suelo_normas_y_contaminacion.pdf. Recuperado el 19 de Mayo de 2013.
39. TORRES K, ZULUAGA T. Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos. 2009. Disponible en: http://www.bdigital.unal.edu.co/815/1/32242005_2009.pdf. Recuperado el 7 de febrero de 2013.
40. INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACIÓN PARA LA AGRICULTURA. Agricultura y ganadería tropical. Disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/templates/lead/pdf/08_article02_es.pdf. Recuperado el 1 de junio de 2013.
41. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Productividad, estabilidad y degradación de los suelos Colombianos. Disponible en: <https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/000001/cap6.pdf>. Recuperado el 2 de junio de 2013.
42. BUNDSCHUH J, PÉREZ A, LITTER M. Distribución del Arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamérica. Disponible en: <http://www.cnea.gov.ar/xxi/ambiental/iberoarsen/docs/LIBROdistribucionarsenico.pdf>. Recuperado el 18 de Mayo de 2013.
43. PROGRAMA INTERNACIONAL DE SEGURIDAD DE LAS SUSTANCIAS QUÍMICAS. El Arsénico. Disponible en: <http://www.greenfacts.org/es/arsenico/>. Recuperado el 1 de Junio de 2013
44. AGENCIA PARA SUSTANCIAS TÓXICAS Y EL REGISTRO DE ENFERMEDADES. La Toxicidad del Arsénico. 2009. Disponible en:

- http://www.atsdr.cdc.gov/es/csem/arsenic/efectos_fisiologicos.html. Recuperado el 25 de febrero de 2013.
45. PARADA R. Metales Pesados y otros elementos. Toxicología Clínica Veterinaria. 2009. Disponible en: <http://www.ropana.cl/Toxivet/Metales%20pesados%20homepage.htm>. Recuperado el 15 de Junio de 2013.
46. GARBISU C, AIZPURUA A, HERNÁNDEZ J, ZARATE O. Investigación estratégica para la protección de suelos y aguas subterráneas. Estrategias de recuperación para la rehabilitación de espacios degradados. 2005. Disponible en: http://www.nasdap.ejgv.euskadi.net/r50-3813/es/contenidos/informacion/resultados_05/es_dapa/adjuntos/berrilur.pdf. Recuperado el 15 de Diciembre de 2012.
47. SANGABRIEL W, FERRERA C. Tolerancia y capacidad de fitorremediación de combustóleo en el suelo por seis especies vegetales. 2006. Disponible en: <http://www.journals.unam.mx/index.php/rica/article/viewFile/21687/21657>. Recuperado el 5 de marzo de 2013.
48. MERA M. Técnicas de fitorremediación con suelos contaminados con plomo. 2012. Disponible en: http://www.campusvirtual.org.ar/aula/file.php/1/TECNICAS_DE_FITORREMEDIAION_DE_SUELOS_CONTAMINADOS_Maria_Fernanda_Mera.pdf. Recuperado el 30 de enero de 2013.
49. SAAD, CASTILLO, REBOLLEDO. Fitorremediación: Estudio de inteligencia tecnológica competitiva. 2009. Disponible en: http://www.concyteg.gob.mx/formulario/MT/MT2009/MT2/SESION4/MT24_MSAAD_04_1.pdf. Recuperado el 10 de Octubre de 2012
50. MEJIA K. Caracterización de dos gramíneas forrajeras de *Brachiaria* (*B. decumbens* y *B. ruziziensis*) y sus recombinantes genéticos por su adaptación a suelos con bajo fosforo disponible y alta saturación de aluminio. 2007. Disponible en: http://ciat-library.cgiar.org/articulos_ciat/TESIS_SERGIO1.pdf. Recuperado el 12 de Octubre de 2012
51. DIAZ A. Propuesta para uso de la fitorremediación para la recuperación de áreas contaminadas por actividades petroleras, con especies vegetales existentes en el estado Monagas. 2006. Disponible en: http://www.cidar.uneg.edu.ve/DB/bcuneg/EDOCS/TESIS/TESIS_POSTGRADO/ESPECI

- [ALIZACIONES/TGETDD53O782006Antonio%20Diaz.pdf](#). Recuperado el 8 de Junio de 2013.
52. TVGAN. Ficha Técnica *Brachiaria decumbens*. Disponible en: http://tvgan.com.co/tienda/cms.php?id_cms=17. Recuperado el 8 de Junio de 2013.
53. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN. 1999. Guía para el manejo eficiente de la nutrición de las plantas. Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/gepnms.pdf>. Recuperado el 8 de Junio de 2013.
54. NUFARM COLOMBIA S.A. *Brachiaria decumbens*. Disponible en: <http://www.nufarm.com/CO/BrachiariaDecumbens>. Recuperado el 27 de Abril de 2013.
55. PÁGINA WEB MUNICIPIO DEL ESPINAL. Disponible en: <http://www.elespinal-tolima.gov.co/index.shtml>. Recuperado el 18 de Mayo de 2013.
56. UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA. Toxicología y química legal. Plaguicidas. Disponible en: http://www.biol.unlp.edu.ar/toxicologia/seminarios/parte_2/plaguicidas.html. Recuperado el 2 de Febrero de 2013.
57. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Memorias técnicas del suelo del Departamento del Tolima. Disponible en: <http://www.igac.gov.co/igac>. Recuperado el 4 de Mayo de 2013
58. CLÍMACO M, RAMÍREZ C. Elaboración y validación para un protocolo de toma de muestras en un suelo contaminado. 2006. Disponible en: http://www.umoar.edu.sv/tesis/AGRONOMIA/Protocolo_de_muestreo_suelo_contaminado.pdf. Recuperado el 5 de marzo de 2013.
59. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Resolución 0062 de 2007. Muestreo en suelos, sedimentos y otros materiales geológicos. Numeral 1.6.1.
60. ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL DE AGUA. Riego de vegetales y bebida de animales. Disponible en: http://www.digesa.sld.pe/DEPA/informes_tecnicos/GRUPO%20DE%20USO%203.pdf. Recuperado el 5 de marzo de 2013.
61. INVERNADERO NOVO. Proyecto Final de Carrera. 2004. Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3933/1/34038-1.pdf>. Recuperado el 20 de Octubre de 2012.

62. UNIVERSIDAD DE GRANADA. El desastre ecológico de Aznalcóllar. Las características de los suelos y el impacto de la contaminación. Disponible en: <http://edafologia.ugr.es/donana/aznal5.htm#anchor1090935>. Recuperado el 23 de Noviembre de 2013.