

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA**

**“UNAD”**

**ESCUELA CIENCIAS AGRICOLAS, PECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**“ECAPMA”**

**ESPECIALIZACIÓN EN BIOTECNOLOGIA AGRARIA**

**TEMA DE LA MONOGRAFIA:**

**EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE MERCURIO CON ESPECIES VEGETALES  
GENÉTICAMENTE MODIFICADAS EN SUELOS CONTAMINADOS POR LA  
EXPLOTACIÓN MINERA ILEGAL EN COLOMBIA.**

**Presentado Por:**

Johanna Andrea Naranjo Aguazaco

Cod. 52531725

**Director Trabajo De Grado:**

José Camilo Torres Romero

Bogotá D, C

Agosto, 2018

## **Agradecimientos**

Llena de felicidad y esperanza dedico este trabajo a Dios por darme la oportunidad de tener mi hermosa familia, quienes han sido mi motivación para salir adelante, en especial a mi esposo quien ha sido el principal promotor para cumplir mis sueños, gracias a el por creer en mí y apoyarme en todas mis decisiones.

Gracias a mis padres que estuvieron a mi lado en cada etapa de mi vida sin importar las adversidades, dándome su apoyo incondicional y evitando que desfallezca en los momentos difíciles. Gracias a ellos soy lo suficientemente valiente para permitirme tener grandes metas, humilde para aceptar mis errores y aprender de ellos y gratitud para nunca olvidar a aquellas personas que me han apoyado y amado a pesar de mis defectos.

1	Tabla de contenido	
2	INTRODUCCIÓN .....	1
3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
4	OBJETIVOS .....	5
4.1	Objetivo General.....	5
4.2	Objetivos Específicos .....	5
5	FUNDAMENTOS DE MINERÍA.....	6
5.1	Tipos de Extracción de Minerales: .....	6
5.1.1	<i>Minería A Gran Escala</i> .....	6
5.1.2	<i>Minería Artesanal y a Pequeña Escala (MAPE)</i> .....	7
5.1.3	Clasificación De Minería: .....	7
5.2	Minería Aurífera en Colombia .....	8
5.2.1	<i>Factores Que Explican La Informalidad Minera En Colombia</i> .....	12
5.3	Efectos Ambientales De La Minería Aurífera .....	14
5.3.1	<i>El Suelo</i> .....	14
5.3.2	<i>El Agua:</i> .....	16
5.3.3	<i>Atmosfera</i> .....	18
5.4	Efectos Sociales De La Minería Aurífera.....	19
5.4.1	<i>Vías Respiratorias (Absorción Por Inhalación Del Vapor De Mercurio)</i> .....	20
5.4.2	<i>Sistema Digestivo (Ingerir Metilmercurio):</i> .....	21
5.4.3	<i>Nivel Renal:</i> .....	21
5.4.4	<i>Nivel Reproductivo:</i> .....	22
5.4.5	<i>Piel:</i> .....	22
5.4.6	<i>Sangre:</i> .....	22
5.4.7	<i>Hipersensibilidad:</i> .....	22
5.5	Falta De Control En El Trabajo y Explotación Infantil.....	23
5.6	Actividades Ilícitas .....	23
6	MERCURIO .....	23
6.1	Generalidades Del Mercurio.....	23
6.2	Características Físicas y Químicas .....	24
6.3	TIPOS DE MERCURIO PRESENTES EN EL AMBIENTE.....	26
6.3.1	<i>Mercurio Inorgánico O Metálico (Hg)</i> .....	26

6.3.2	<i>Mercurio Orgánico O Metilmercurio (Mehg)</i> .....	26
6.4	Ciclo Del Mercurio.....	27
6.5	Ciclo Local Del Mercurio.....	28
6.6	Ciclo De Biotransformación.....	28
6.7	Plantas Metalófitas O Hiperacumuladoras .....	33
6.8	Transporte De Contaminantes Orgánicos En Las Plantas .....	35
6.9	Transporte De Contaminantes Inorgánicos En Las Plantas.....	36
6.10	Técnicas De Fitorremediación.....	38
6.11	Mecanismos Bioquímicos De Fitorremediación De Metales Pesados .....	41
6.11.1	<i>Metal-Proteínas O Metalotioneinas</i> .....	41
6.11.2	<i>Quelación</i> .....	42
6.12	Dinámica De La Acumulación De Los Metales En Las Plantas .....	43
6.13	Plantas Genéticamente Modificadas Para Remoción De Mercurio.....	45
6.13.1	<i>Proceso Para Transformar Una Planta Genéticamente</i> .....	45
6.13.2	<i>Vector Genético</i> .....	49
6.13.3	<i>Plásmido</i> .....	49
6.13.4	<i>Operon Gen MerA</i> .....	49
6.14	Características De Las Técnicas Mas Usadas De Transformación Vegetal.....	51
6.15	Ventajas Y Desventajas De La Fitorremediación.....	54
6.16	Plantas Exitosas Que Permiten Metabolizar Mercurio.....	55
7	RESTAURACIÓN ECOLOGICA.....	56
7.1	Pasos Fundamentales En La Restauración Ecológica .....	57
7.1.1	<i>Paso 1- Definir El Ecosistema De Referencia</i> .....	59
7.1.2	<i>Paso 2- Evaluar El Estado Actual Del Ecosistema</i> .....	60
7.1.3	<i>Paso 3- Definir Las Escalas Y Niveles De Organización</i> .....	61
7.1.4	<i>Paso 4- Establecer Las Escalas Y Jerarquías De Disturbio</i> .....	63
7.1.5	<i>Paso 5- Consolidar La Participación Comunitaria</i> .....	63
7.1.6	<i>Paso 6- Evaluar El Potencial De Regeneración</i> .....	64
7.1.7	<i>Paso 7- Establecer Los Tensionantes Para La Restauración A Diferentes Escalas</i> 64	
7.1.8	<i>Paso 8- Seleccionar Las Especies Adecuadas Para La Restauración</i> .....	66
7.1.9	<i>Paso 9- Propagar Y Manejar Las Especies</i> .....	66
7.1.10	<i>Paso 10- Seleccionar Los Sitios</i> .....	66

7.1.11	<i>Paso 11- Diseño De Acciones Para La Restauración.....</i>	67
7.1.12	<i>Paso 12- Monitorear El Proceso De Restauración .....</i>	68
7.1.13	<i>Paso 13- Consolidar El Proceso De Restauración.....</i>	69
9	CONCLUSIONES .....	70
10	BIBLIOGRAFIA.....	71

## **CONTENIDO DE TABLAS**

Tabla 1. Departamentos Afectados Por La Explotación Minera.....	9
Tabla 2- Municipios Más Afectados Por La Minería Ilegal .....	10
Tabla 3-Técnicas De Fitorremediación .....	38
Tabla 4-Técnicas Más Usadas De Transformación Vegetal .....	51
Tabla 5- Ventajas Y Desventajas De La Fitorremediación .....	54
Tabla 6- Tensionantes Relacionados Con El Establecimiento De Las Plantas .....	65
Tabla 7-Tensionantes Relacionados Con La Persistencia De Las Plantas .....	65

## **CONTENIDO DE IMAGENES**

Imagen 1- Afectaciones en el suelo por la minería ilegal .....	15
Imagen 2- Afectación del agua a causa de la minería Ilegal .....	16
Imagen 3- Alteración en el régimen hidrológico .....	17
Imagen 4-Efectos En La Salud Humana .....	20
Imagen 5-Ciclo del mercurio en el medio ambiente .....	27
Imagen 6-Ciclo de biotransformación del mercurio .....	30
Imagen 7- Transformación del mercurio en medio acuático.....	32
Imagen 8-Tipos de fitorremediación donde se indica la zona de la planta donde ocurre el proceso .....	40
Imagen 9- Dinámicas de acumulación de mercurio en las plantas .....	44
Imagen 10-Diseño de un cultivo genéticamente modificado .....	48
Imagen 11- Pasos para tener en cuenta en un proyecto de restauración ecológica.....	58

## 2 INTRODUCCIÓN

Colombia es un país rico en recursos minerales lo cual han sido explotados desde la época precolombina de manera artesanal en diferentes zonas geográficas del país lo que ha traído beneficios económicos hasta el día de hoy, pero también ha dejado daños irreversibles al medio ambiente, afectaciones a la salud de la población de los municipios donde se realiza y perturbación del equilibrio social e incluso la seguridad nacional; provocando la proliferación de explotaciones ilegales de oro. (PNUMA - MADS. 2012).

Para estas actividades se utilizan altos niveles de mercurio los cuales son depositados en el medio ambiente lo que conlleva a un problema creciente de orden ambiental y social a nivel mundial, dicho compuesto se puede encontrar en el aire, agua y suelo; el cual puede ser muy peligroso para la salud humana lo cual ingresa al cuerpo humano principalmente a través de dos rutas, a saber: la inhalación y la ingestión, siendo la ingestión la principal vía de exposición a estos elementos en la población humana

A diferencia de los compuestos orgánicos este no puede ser biodegradado, razón por lo cual las concentraciones en los compartimientos ambientales aumentan continuamente; lo que hace que se incorpore a la cadena trófica.

La minería artesanal tiene cuatro procesos que involucra el Hg de manera indiscriminada de la siguiente forma: En la amalgamación se mezcla de manera manual la roca triturada enriquecida de oro con Hg metálico, posteriormente se libera el exceso de mercurio, generalmente en cercanías a corrientes de agua; la amalgama producida es de alta densidad y puede ser separada del resto de sedimentos por precipitación; luego esta amalgama es sometida a altas temperaturas con lo que se puede separar el oro sólido del Hg, siendo este último liberado al ambiente (como Hg<sup>0</sup>) en forma de vapor (Hinton J, Veiga M, 2001)

En el desarrollo de los procesos anteriores, se genera el derramamiento directo de grandes cantidades de mercurio a suelos, ríos y en cuerpos de agua como ciénagas y lagunas.

Por lo anteriormente expuesto se presenta una técnica de biorremediación emergente llamada fitorremediación el cual usa plantas hiperacumuladoras las cuales se puede modificar genéticamente para mejorar su capacidad de remover, transferir, estabilizar y/o degradar contaminantes en suelo, sedimentos y agua.

Dichas plantas tienen una habilidad notable para extraer y concentrar contaminantes a partir del aire a través de las estomas, y del agua y suelo por medio de su rizósfera; también cuentan con mecanismos en su metabolismo para poder realizar transporte de metales el cual se caracteriza, además por tener respuestas enzimáticas para frenar el estrés oxidativo provocado por el incremento en la concentración celular de metales tóxicos.

Para finalizar se propone estrategias de restauración ecológica la cual permitirá recomponer y reparar los ecosistemas con el fin recuperar tanto la biodiversidad como los servicios ecosistémicos.

### 3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La falta de control del Estado sobre la explotación de los recursos del sub-suelo contrasta con el creciente hallazgo de zonas con potencial de explotación minera. Así se observa una insuficiente gestión pública de los recursos acompañada de una alta demanda por los particulares alentando de esta manera la informalidad. La minería ilegal no solo constituye un quebrantamiento de la ley, sino que además irradia efectos negativos en los ámbitos ambientales y económicos; esta actividad como lo menciona la ONU, invalida el control y la administración de los recursos del Estado por lo que genera un enorme costo social cada vez que afecta fuentes de empleo, ingresos tributarios y perjudica la oferta ambiental, vital para la comunidad. (Procuraduría General de la Nación s.f.).

Si bien la minería legal no siempre garantiza la inexistencia de efectos negativos, la ilegal no permite establecer medidas que mitiguen, compensen, subsanen y corrijan los impactos generados, todo esto dentro del marco de licenciamiento ambiental (Procuraduría General de la Nación s.f.).

Esta actividad de exploración y explotación inicialmente consiste en la deforestación de la flora nativa donde nunca había existido actividad humana, el método más utilizado para erradicar los bosques es la tala y excavación con medios mecánicos o explosivos de miles de hectáreas acciones que ejercen fuertes efectos sobre los ecosistemas entre los que se destacan:

*“Destrucción de nichos ecológicos y cadenas tróficas, destrucción de potencial genético, erosión edáfica, destrucción de cobertura vegetal nativa, alteraciones en los regímenes de lluvias y clima local, aumento considerable de emisiones de CO<sub>2</sub>, Emisiones de gases tóxicos provenientes del mercurio, desaparición de bellezas escénicas y paisajísticas, extinción de especies endémicas,*

*deterioro de nacimientos de agua, contaminación por metales pesados de suelo, aire y cuerpos de agua.” (DNE, 2010).*

Posteriormente en el proceso de explotación emplea indiscriminadamente el mercurio para separarlo de otros metales, gracias a su bajo costo es fácil de conseguir rápida y eficazmente; sin embargo es peligroso para la salud humana y los ecosistemas. El mercurio inorgánico se combina con el oro formando un amalgama que se somete a temperaturas extremas mediante fuego, provocando evaporación y contaminando aire, tierra y agua e ingresando al organismo humano. Esta polución de mercurio afecta a los mineros, la población aledaña y a las comunidades distantes debido a que se deposita en el suelo y en las cuencas hídricas, arrastrando los desechos hasta el mar para luego incorporarse a la cadena trófica. (López-Bravo et al. 2016).

Por lo anteriormente expuesto se presentara una recopilación literaria de técnicas biotecnológicas que permiten revertir la degradación de los ecosistemas con especies vegetales genéticamente modificadas para que tengan la capacidad de catalizar el mercurio y reducirlo en forma volátil y poco toxica en estado gaseoso al medio ambiente (Porque biotecnología, s,f).

Dichos procesos permiten no solo revertir la degradación de los ecosistemas sino aumentar la calidad del habitat para la fauna, aumentando la cobertura nativa e incrementando la conectividad de los elementos del paisaje (Memorias I Congreso Colombiano de restauración ecológica, 2011).

## **4 OBJETIVOS**

### **4.1 Objetivo General**

Recopilación literaria de estrategias de fitorremediación para restaurar suelos mediante especies vegetales genéticamente modificadas con el gen MerA para los suelos contaminados con mercurio en Colombia, acorde con los procesos de uso del suelo, que puedan servir para la recuperación de áreas con condiciones similares a las presentes.

### **4.2 Objetivos Específicos**

- Presentar los estudios de las implicaciones Ambientales y Sociales de la minería ilegal en Colombia.
- Exponer características físicas y químicas del mercurio.
- Compilar investigaciones de técnicas de fitorremediación viables para el tratamiento de suelos contaminados con mercurio, a partir de plantas genéticamente modificadas con el gen merA.
- Presentar a partir de las investigaciones, mecanismos que aumenten la cobertura nativa con el fin de crear la conectividad del paisaje rural restaurando los corredores de hábitats

## **5 FUNDAMENTOS DE MINERIA**

La minería se define como Técnica que se relaciona con descubrimiento y explotación de yacimientos minerales relacionados con trabajos subterráneos enfocados al arranque y tratamiento de una mena o roca asociada, incluye operaciones a cielo abierto, canteras, dragado aluvial y operaciones combinadas que contiene el tratamiento y la transformación bajo tierra o en superficie. (Glosario técnico minero, 2015 pg,109), por otra parte, los minerales de mena se entienden como Mineral que puede utilizarse para obtener uno o más metales; aunque también pueden estar en forma de metal nativo o como combinaciones de los metales. Los minerales de mena son aquellos que pueden ser beneficiados, lo cual hace que tengan importancia económica, es decir, económicamente explotables bajo condiciones normales, por ejemplo, oro nativo. (Ministerio de minas y Energía, 2015 pg,108).

Según la Defensoría del Pueblo (2010) la minería de hecho en Colombia gracias a su diversidad de ambientes dispone de una variedad de productos mineros como son el carbón, oro, platino, níquel esmeraldas y calizas, así como otras a menor escala como sal, roca fosfórica, arcillas, arenas silíceas, minerales de cobre y manganeso, magnesita, barita, yeso y varios tipos de rocas ornamentales.

### **5.1 Tipos de Extracción de Minerales:**

#### **5.1.1 Minería A Gran Escala**

El Ministerio de Minas y Energía (2012) define la minería a gran escala como: [...] un proceso que comprende varias etapas (ciclo minero): prospección, exploración, construcción y montaje, explotación, transporte y beneficio de minerales. La minería siempre debe hacerse

respetando el medio ambiente y haciendo buen uso de los recursos naturales renovables y no renovables [...]

### **5.1.2 Minería Artesanal y a Pequeña Escala (MAPE)**

Se refiere a las actividades informales llevadas a cabo utilizando poca tecnología y maquinaria. Suele referirse, en términos generales, a la minería practicada por individuos, grupos o comunidades, usualmente de manera informal, dicha minería suele llamarse minería ilegal ya que trabajan al margen de la ley. También incluye trabajos y obras de exploración sin título minero y/o realizan minería amparada por un título minero, pero donde la extracción, o parte de ella, se realiza por fuera del área otorgada en la licencia. (Ministerio de minas y Energía, 2015 pg,108).

La gran mayoría son personas muy pobres que explotan depósitos marginales en condiciones extremadamente severas y, a menudo, peligrosas – y que provocan un considerable impacto ambiental. La MAPE es una estrategia de subsistencia utilizada principalmente en las áreas rurales.

La minería ilegal también denominada barequeo, se describe en la Ley 685 de 2001 (Artículo 155) como la actividad que consiste en “el lavado de arenas por medios manuales sin ninguna ayuda de maquinaria o medios mecánicos y con el objeto de separar y recoger metales preciosos contenidos en dichas arenas” (Congreso de Colombia, 2001).

### **5.1.3 Clasificación De Minería:**

#### **5.1.3.1 A Cielo Abierto:**

Es la excavación que se realiza al aire libre, para sacar o extraer los minerales que se encuentran a poca profundidad o en la superficie

#### **5.1.3.2 Subterráneo:**

Es la extracción y transporte de los minerales que se encuentran al interior de la montaña o a gran profundidad bajo el suelo y que se sacan a través de túneles que conducen a la superficie

## **5.2 Minería Aurífera en Colombia**

La minería de oro en Colombia ha sido de gran impacto ya que ha llegado a representar el 2,1% del PIB, lo cual indica que es de gran importancia para las exportaciones del país convirtiéndose en un sector importante para la economía de Colombia. (Cárdenas & Reina, 2008)

Siendo la minería una actividad tradicional en varios de los municipios de Colombia, se muestra que el 44% tiene explotaciones mineras, y han sido desarrolladas desde la época colonial por mineros que han transmitido sus conocimientos a sus descendientes y que han encontrado en esta actividad su única forma de subsistencia; en particular, en zonas con poca presencia de la institucionalidad del Estado. (Defensoría del pueblo – Minería de Hecho en Colombia, 2010)

No obstante, de un tiempo para acá la mecanización esta actividad, su clandestinidad, el escaso control de las autoridades, la situación de orden público y el uso desafortunado de insumos químicos como el mercurio en el caso de la minería de oro han traído nefastas consecuencias para los ecosistemas, con un agravio especial para los recursos hídricos, que ha convertido a la minería de hecho en el problema más sensible desde el punto de vista del impacto ambiental que tiene hoy en día el país (Defensoría del pueblo – Minería de Hecho en Colombia, 2010)

Los mayores efectos sobre los recursos hídricos se deben principalmente a la fiebre del oro en varias regiones lo que conlleva a la utilización de toneladas de productos químicos que terminan en los ríos circunvecinos y en las aguas freáticas, lo cual genera problemas de salubridad pública irreversibles, con consecuencias a corto y largo plazo. (Defensoría del pueblo – Minería de Hecho en Colombia, 2010)

Hay dos modalidades de extracción de estos recursos mineros: la primera formal y de gran escala; la segunda a escalas menores, tradicional y artesanal, con una reconocida carencia de tecnología adecuada y definida, en muchos casos, informal y de subsistencia, lo que la hace insegura, poco rentable, no competitiva y ambientalmente no sostenible

Sin embargo, Según UNODOC para el año 2014 Colombia tenía 78.939 hectáreas con explotación de oro de Aluvión (EVOA), distribuidas en 17 de los 32 departamentos del país. El cual el 79% se encuentra en dos departamentos como son Antioquia y Chocó siendo Nechí (Antioquia) el municipio que presenta la mayor área afectada (6.232 ha) representando el 8% de la afectación nacional.

***Tabla 1. Departamentos Afectados Por La Explotación Minera***

<b>Departamentos afectados por explotación minera de oro</b>		<b>78.939 ha</b>
<b>DEPARTAMENTO</b>	<b>HECTAREAS</b>	<b>PORCENTAJE TOTAL NACIONAL 2014</b>
<b>Choco</b>	36.185	46
<b>Antioquia</b>	26.323	33
<b>Bolívar</b>	7.361	9
<b>Córdoba</b>	3.544	4
<b>Nariño</b>	1.676	2
<b>Valle</b>	1.570	2
<b>Cauca</b>	1.408	2
<b>Otros</b>	872	1

Fuente: (UNODOC, 2016)

**Tabla 2- Municipios Más Afectados Por La Minería Ilegal**

<b>DEPARTAMENTO</b>	<b>MUNICIPIO</b>	<b>HECTAREAS</b>	<b>PORCENTAJE</b>
<b>Antioquia</b>	Nechi	6.232	8%
<b>Choco</b>	Notavita	5.175	7%
<b>Choco</b>	Istmina	5.069	6%
<b>Antioquia</b>	Zaragoza	4.887	6%
<b>Antioquia</b>	Condoto	4.543	6%

*Fuente: (UNODOC ,2016)*

Los Consejos comunitarios resultaron ser los territorios especiales más afectados ya que el 46% de las explotaciones de oro se encuentra en este tipo de territorios, lo cual confirma que el diseño de política pública debería considerar las particularidades de estas unidades. (UNODOC, 2016)

Respecto a Parques Nacionales, cinco de ellos ya presentan EVOA al interior del parque y 9 más en zonas cercanas. . (UNODOC, 2016)

El 51% del área nacional la explotación de oro se concentra en las subcuencas de los ríos Quito, Bajo Nechí, Tamaná y San Juan. . (UNODOC, 2016)

Creando la pérdida total de cobertura de alto valor ambiental (bosque natural, vegetación secundaria y otros tipos de coberturas leñosas) asociada a las actividades de explotación de oro de aluvión que fue de 24.450 ha para el año 2014 y se concentró en Chocó con el 77%. (UNODOC, 2016)

A pesar de que el gobierno a través de las entidades encargadas en materia ambiental, han expedido normas que buscan la eliminación y prohibición del uso del mercurio en los próximos 5 años, esto no ha podido materializarse debido a que en la actualidad siguen ingresado al país

aproximadamente unas 118,8 toneladas del metal de forma clandestina, de contrabando por la frontera con Ecuador y en algunos casos es traído por empresas legalmente constituidas, que lo exportan para otras industrias; sin embargo, un gran porcentaje de este termina como parte de la minería ilegal, generando el problema ambiental y sanitario que está afectando gravemente al país en muchas zonas (Unidad Investigativa, 2017).

De acuerdo con una indagación realizada por la Unidad Investigativa del periódico El Tiempo (Unidad Investigativa, 2017), se ha identificado que Colombia Para obtener un gramo de oro, se requieren aproximadamente 5 gramos de mercurio, esto multiplicado por el número de minas y la cantidad de gramos de oro extraída, está generando daños difícilmente remediables en las zonas donde se practica este tipo de minería. Este mercurio que es importado desde la China puede superar las 50 toneladas por año.

Según datos de algunas ONGs como Mercury Watch, somos el tercer país que más libera mercurio a nivel mundial, con unas 75 toneladas al año aproximadamente, siendo superados solo por China e Indonesia. El mercurio que se desvía a las zonas de explotación minera es distribuido y fundido por los negociantes de compraventa de oro, quienes lo regalan a los mineros a cambio de ser prioridad a la hora de vender el oro producido. Este fenómeno se da principalmente en municipios como Quibdó en el Choco, Nechí en Antioquia y Barbacoas en Nariño, donde es común que separen el oro de la amalgama con las manos o con sopletes a altas temperaturas, llegando a recuperar un 40 por ciento de mercurio; sin embargo, el otro 60 por ciento se dispersa en la atmosfera y empieza su efecto letal (Artisanal Gold Council ,2014).

La ley 1658 del 2013 identifica el uso del mercurio asociado a las diferentes actividades productivas, especialmente a la actividad minera, y reconoce los impactos ambientales en el aire, el agua y el suelo que ponen en riesgo los servicios ecosistémicos y la salud de las personas

expuestas a la sustancia, tanto de manera directa como indirecta y cuya responsabilidad se identifica como un ciclo que se inicia en el usuario minero e involucra a las instituciones del sector. Igualmente legisla la erradicación del uso del mercurio para la minería en un plazo máximo de 5 años a partir de la expedición de la ley. Lo cual genera la necesidad de realizar investigaciones en alternativas limpias, que disminuyan el uso de mercurio en la extracción del oro y la recuperación de las zonas que están contaminadas con este metal. (Benítez Y, 2017)

### **5.2.1 Factores Que Explican La Informalidad Minera En Colombia**

- 1. “Aislamiento espacial: la localización geográfica de recursos naturales puede darse en lugares de difícil acceso, con poca presencia del Estado, precarios servicios e infraestructura. Esto dificulta la comunicación entre estas comunidades mineras con las autoridades mineras y vuelve muy costoso e improbable el control y la fiscalización.*
- 2. Limitadas oportunidades de diversificación: las zonas donde se desarrollan estas actividades informales son en su mayoría zonas rurales con importante vocación agrícola, donde no hay diversificación de las actividades productivas. Son zonas con precarias oportunidades de empleabilidad y con elevados niveles de pobreza.*
- 3. Coyuntura favorable en los precios de commodities: en la última década se observó un importante aumento en los precios internacionales de algunos minerales, en particular de la plata, el hierro y el oro, lo cual ha llevado en varios países a un renovado interés por la explotación de minerales. En particular, esta favorable coyuntura de precios ha generado el surgimiento de un nuevo tipo de minería informal, clasificada en la literatura como “rushmining” que puede ser peligrosa ya que, por el afán de generar rápidas ganancias, poco se respetan las leyes ni se aplican los estándares requeridos para la explotación de*

*los minerales. Además, la favorable coyuntura de precios hace que la actividad minera se vuelva más rentable con respecto de actividades tradicionales.*

- 4. Simbiosis con actividades ilícitas:** *un factor particular al caso colombiano es que la explotación minera en algunos casos ha sido permeada por grupos al margen de la ley que pueden estar ya sea lavando dinero del narcotráfico mediante la producción de minerales o financiando sus actividades ilícitas con el control directo o indirecto de esta actividad. Existe evidencia que señala que en algunas regiones del país se presenta una sustitución entre los cultivos de coca y la minería (en particular la minería aurífera), como diversificación del portafolio de actividades ilícitas.*
- 5. Desarticulación institucional de las autoridades reguladoras y fiscalizadoras:** *falta mayor coordinación entre la autoridad minera, la autoridad ambiental y las autoridades locales. Adicionalmente se observa escasez de recursos (físicos, humanos, financieros, etc.) orientados a fortalecer las estructuras organizativas de las agencias a cargo del proceso de formalización. Todo esto genera un precario control, monitoreo, baja fiscalización y en general débil aplicación de la normatividad vigente a la actividad.*
- 6. Marco regulatorio inadecuado y trámites costosos:** *en la literatura internacional se resalta que, con frecuencia, el marco normativo de los países donde existe minería informal, no se adapta a las realidades propias de la Minería Artesanal y a Pequeña Escala (MAPE). Estos marcos normativos les exigen requisitos, procesos y procedimientos que están fuera de su alcance. La mayoría de veces este marco normativo ha sido diseñado para explotaciones a mediana y gran escala que son de por sí muy diferentes de las de la MAPE.*
- 7. Fallas de mercado:** *Otro factor que puede generar informalidad es la falta de financiamiento de la actividad, en particular la falta de acceso al financiamiento formal y*

*con tasas de interés adecuadas. Lo anterior, fortalece el rol de los intermediarios (i.e. proveedores de insumos o compradores de oro), que en ocasiones juegan un rol de proveedores de financiamiento y crédito para la actividad. Por supuesto dada su posición de poder en la cadena de valor frente al pequeño minero informal que tiene que “blanquear” o “formalizar” su producción para poder venderla, estos intermediarios imponen precios, tiempos, formas de pago, etc., que no permiten que la actividad sea sostenible, ni formal.” (Goñi E, Sabogal A, Asmat R, 2014 )*

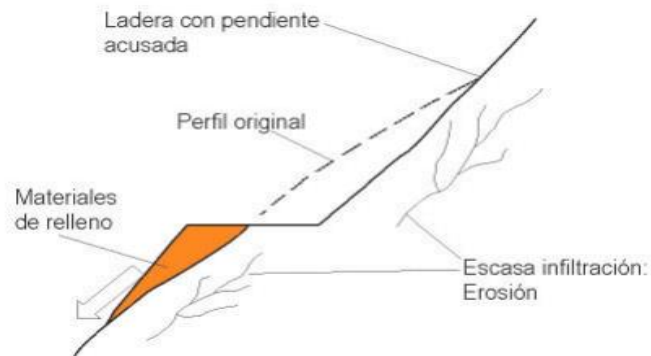
### **5.3 Efectos Ambientales De La Minería Aurífera**

La falta de control del Estado respecto a la explotación de los recursos naturales ha generado un creciente avance de la minería en Colombia originando una serie de daño a los ecosistemas, con mayor impacto en áreas de protección ambiental.

#### **5.3.1 El Suelo**

Se ve afectado en las diferentes etapas de la producción de aurífera, los elementos bióticos y abióticos como son la hidrología y vegetación muestran alteraciones, lo que genera consecuencias en la calidad del paisaje como el ambiente de las regiones.

- ❖ **Desertización:** Pérdida de suelo fértil, erosión y deforestación
- ❖ **Modificación del relieve:** impacto visual, alteración de la dinámica de los procesos de ladera.
- ❖ **Peligros Geotécnicos:** Desestabilización de laderas por sobrecargas y/o excavaciones y alteraciones en el nivel freático.
- ❖ **Subsidencia por huecos:** hundimiento del suelo por depresión en el nivel freático.



***Imagen 1- Afectaciones En El Suelo Por La Minería Ilegal***

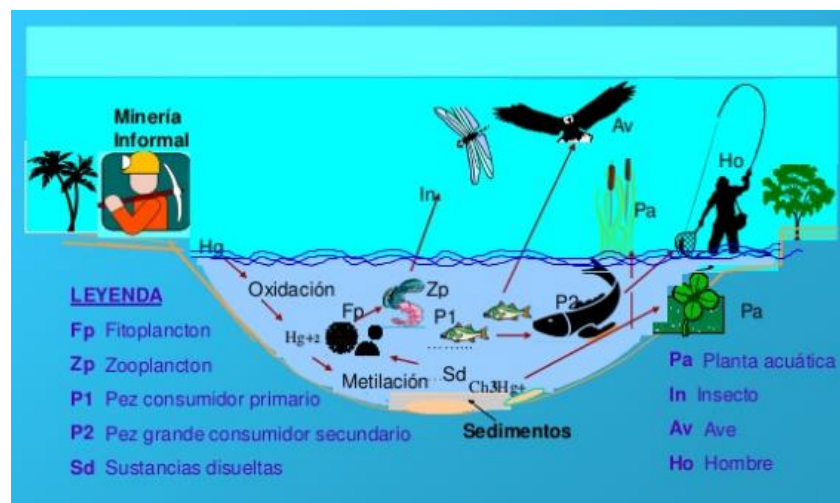
Fuente: Lillo J (s,f) Lillo J (S,F) Impactos de la minería en el medio natural, Grupo de geología Universidad Rey Juan Carlos, Recuperado el 17 de junio de 2018 disponible en: <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag15564/Impactos%20de%20la%20miner%C3%ADa%20-%20Javier%20Lillo.pdf>

- ❖ **Pérdidas de propiedades físicas:** Variaciones en la textura (porosidad, permeabilidad) por procesos de esponjamiento, compactación, deposición de partículas, formación de costras.
- ❖ **Pérdida de la estructura edáfica por compactación,** mezcla de horizontes, deposición de partículas, etc.
- ❖ **Pérdida física de suelo por extracción y arranque,** acumulación de vertidos (escombreras y balsas) o construcción de infraestructuras. Por erosión inducida.
- ❖ **Alteraciones en la horizonación** por arranque y/o mezcla de horizontes, deposición de vertidos y polvo. Pérdida de los horizontes superficiales por erosión inducida.
- ❖ **Pérdida de propiedades Químicas:** Contaminación por metales pesados (Cu, Pb, Cd, Hg, etc), metaloides (As) e hidrocarburos generada por efluentes líquidos y sólidos.
  - Acidificación por acumulación y oxidación de sulfuros y drenaje ácido

- Adición de sales al suelo (sulfatos).(Lillo J s,f)

### 5.3.2 El Agua:

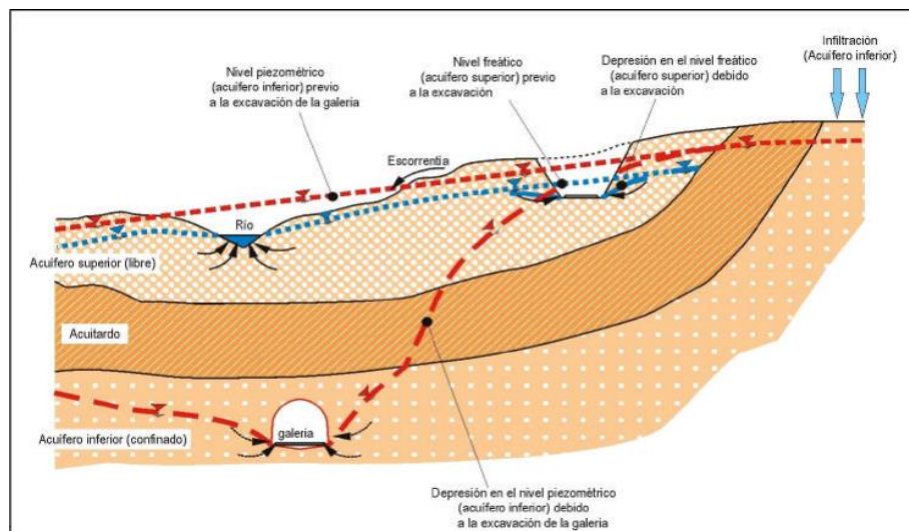
El uso deficiente del mercurio hace que la polución de mercurio afecta a los mineros, población de su alrededor y comunidades distantes debido a que el mercurio que se deposita en las cuencas hídricas es arrastrado por la corriente hidrostática hasta su desembocadura en el mar, donde existen bacterias sulfato reductoras que metilizan al mercurio inorgánico obteniendo metilmercurio (MeHg), que se impregna en los fitoplancton marinos que son ingeridos por los peces y otros organismos propios de este medio ambiente, incorporándose a la cadena trófica alimenticia (Bravo M, Santos J, Abad C, Segura M, Pérez J, 2016):



**Imagen 2- Afectación Del Agua A Causa De La Minería Ilegal**

*Fuente: (Cuadros D, 2010) Cuadros D, (2010) Uso, efectos y recuperación del mercurio en la minería aluvial en Madre de Dios, Ministerio de Energía y Minas Dirección general de minería oficina desconcentrada Madre de Dios, Última consulta: 02 de julio 2018, Disponible en: <https://es.slideshare.net/DavidCuadrosTorres/10-uso-y-recuperacion-del-mercurio-en-mineria-mdd-julio-2010>*

- ❖ **Alteraciones en la dinámica fluvial:** Variación del perfil y trazado de la corriente fluvial, variaciones en el nivel de base local, alteración en la dinámica (variaciones en las tasas de erosión/sedimentación) en el perfil (aguas abajo y aguas arriba) por excavaciones, diques y represas. Aumento de la peligrosidad de inundación.
- ❖ **Incorporación de partículas sólidas en la corriente,** aumento de la carga de fondo y en suspensión, incremento en las tasas de sedimentación aguas abajo.
- ❖ **Alteraciones en el régimen hidrogeológico:** Variaciones en el nivel freático, variaciones en el régimen de recarga y modificaciones en el flujo subterráneo por efectos barrera, drenajes inducidos, infiltración restringida/favorecida, compactación, modificación del relieve, deforestación.



**Imagen 3- Alteración En El Régimen Hidrológico**

fuelle: (Lillo J, s,f) Lillo J (s,f) *Impactos de la minería en el medio natural*, Grupo de geología Universidad Rey Juan Carlos, Recuperado el 17 de junio de 2018 disponible

en: <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag15564/Impactos%20de%20la%20miner%C3%ADa%20-%20Javier%20Lillo.pdf>

- ❖ **Producto de la eliminación del horizonte A** o capa orgánica del suelo, lo que conlleva a una alteración en sus propiedades físicas y químicas, además de perder la estructura edáfica, generar procesos de inestabilidad, desertificar o esterilizar la zona, e incrementar la erosión, al remover grandes cantidades de suelo, se altera su calidad y afecta la capacidad de soporte de la actividad biológica y la regulación hídrica. Asimismo, es contaminado con sustancias químicas, combustibles, lubricantes y por la disposición de residuos, estériles y escombros. (Lillo F, s,f)
- ❖ **Contaminación por metales pesados y metaloides:** Se pueden encontrar coloides en suspensión e incorporación de los metales en la fase sólida por adsorción.
- ❖ **Variaciones del pH** por el drenaje ácido de la mina; se obtienen aguas de pH muy bajo (2-3), cargadas en aniones (sobre todo sulfatos), en las que generalmente son más solubles los metales pesados como Pb, Zn, Cu, As, Cd.

### 5.3.3 *Atmosfera*

- ❖ Afectación del aire por material particulado, en las zonas desprovistas de cobertura vegetal, debido a que están expuestas a factores exógenos como el viento
- ❖ Afectación atmosférica por emisión de gases derivados del consumo y almacenamiento de combustibles, la quema de mercurio y la utilización de maquinaria (retroexcavadoras, dragas y mini - dragas) utilizada en los sectores que son explotados. Además de la generación excesiva de ruidos, por el uso de esta. (Contraloría General de la república, 2013)

❖ **Flora:**

- Especies Herbáceas: Desmonte y quema de vegetación
- Especies Arbóreas: Deforestación

❖ **Fauna:**

- Pérdida de biodiversidad debido al descapote que realizan para conformar las terrazas de explotación, creando un efecto visual negativo, que además altera las condiciones naturales del paisaje.
- Alteración y fragmentación de hábitats que generan migración y extinción de individuos y especies
- Alteración de las relaciones ecosistémicas: La fragmentación del ecosistema y de hábitats genera el desplazamiento de especies de fauna, alterando flujos energéticos y ciclos de vida de especies, que en algunos casos son endémicas. (Contraloría General de la república, 2013)

## 5.4 Efectos Sociales De La Minería Aurífera

❖ **Efectos En La Salud**



### ***Imagen 4-Efectos En La Salud Humana***

*Fuente: (Cuadros D, 2010) Cuadros D, (2010) Uso, efectos y recuperación del mercurio en la minería aluvial en Madre de Dios, Ministerio de Energía y Minas Dirección general de minería oficina desconcentrada Madre de Dios, Última consulta: 02 de julio 2018, Disponible en: <https://es.slideshare.net/DavidCuadrosTorres/10-uso-y-recuperacion-del-mercurio-en-mineria-mdd-julio-2010>*

Los mineros artesanales decantan el oro con mercurio el cual es depositado en los ríos y suelo, al entrar en contacto con el agua se vuelve metilmercurio el cual es un químico muy contaminante que genera efectos negativos en los seres vivos que están en contacto con el o lo ingieren; los efectos sobre la salud son los siguientes:

#### ***5.4.1 Vías Respiratorias (Absorción Por Inhalación Del Vapor De Mercurio)***

El vapor de mercurio es no polar (no se disuelve en la membrana mucosa del tracto nasofaríngeo y traqueo bronquial) y fácilmente penetra la membrana alveolar y pasa a la sangre absorbiéndose un 80% de la cantidad inhalada. Generalmente los gases y vapores se depositan en el tracto respiratorio de acuerdo con su solubilidad en agua. Los gases altamente solubles en agua se disuelven en la mucosa de la membrana o en el fluido del tracto respiratorio superior, mientras que los gases y vapores menos solubles en agua, penetran más profundamente en el árbol bronquial alcanzando el alvéolo. Dado que el vapor de mercurio elemental es ligeramente soluble en agua, puede esperarse que penetre profundamente en el árbol bronquial alcanzando el alvéolo. (Mamani G, 2013)

La inhalación prolongada de vapores de mercurio puede alterar a nivel de la cavidad nasal que afectaban a la temperatura de la mucosa, movilidad del epitelio ciliar, permeabilidad, función secretora y rinitis. Los síntomas respiratorios son: dolor de garganta, tos dolor torácico, hemoptisis,

opresión de pecho, dificultad para respirar, respiración acortada, dolor de cabeza, bronquitis, neumonitis, irritación pulmonar, edema pulmonar. (Mamani G, 2013)

#### **5.4.2 Sistema Digestivo (Ingerir Metilmercurio):**

Al ingerir pescado o granos contaminados con metilmercurio las alteraciones del sistema digestivo inician con náuseas, vómitos y diarrea. El hallazgo más significativo es la denominada “estomatitis mercurial” cuyo principal síntoma es la sialorrea, a menudo acompañada de hipertrofia de las glándulas salivares. posteriormente aparece gingivitis e incluso ulceraciones en la mucosa bucal. Hay caída prematura de los dientes y el paciente experimenta en ocasiones una sensación de alargamiento de los mismos. (Mamani G, 2013) (Bravo M, Santos J, Abad C, Segura M, Perez J, 2016)

La estomatitis comienza con los síntomas más subjetivos de la gingivitis, que van acompañados o rápidamente seguidos de aumento de salivación (ptialismo mercurial) y blanqueo de la lengua. Al comer y beber se produce una sensación abrazadora y malestar en la boca, inflamación e hinchazón progresiva en las encías, aparecen úlceras y hay hemorragias espontáneas. En casos agudos hay fiebre alta, inflamación de los ganglios submaxilares y mal aliento. Otros desórdenes gastrointestinales encontrados en la intoxicación mercurial son la gastritis y la gastroduodenitis. (Mamani G, 2013)

#### **5.4.3 Nivel Renal:**

Efecto nefrotóxico del mercurio elemental se manifiesta por daño en el glomérulo y en los túbulos renales.

Se manifiesta como un daño al túbulo proximal en su zona media y eventualmente en el terminal, según el grado de intoxicación aparece en focos de necrosis y calcificaciones locales. Las

lesiones tubulares pueden originar una fibrosis intersticial. Las alteraciones a nivel de glomérulo se manifiestan en forma de una glomerulonefritis, ahora bien, esta solo aparece con ocasión de intoxicaciones crónicas. (Mamani G, 2013)

#### **5.4.4 Nivel Reproductivo:**

El mercurio en mujeres embarazadas traspasa la placenta, complicaciones con el embarazo, en el parto nacen bebés de bajo peso, disturbios en la menstruación, disminución de las concepciones, pérdida temprana del feto, fertilidad, defectos durante el nacimiento y mortinatalidad, abortos espontáneos. Así mismo también se describen deficiencia cognitiva, retraso al andar y el habla, retraso mental, falta de coordinación, ceguera. (Mamani G, 2013)

#### **5.4.5 Piel:**

Dermatitis de contacto localizada en manos, antebrazos o cara y lesiones hiperqueratósicas que pueden ulcerarse; y, en exposición crónica, alopecia reversible. Rinitis y conjuntivitis: causadas por acción irritativa directa del mercurio.

#### **5.4.6 Sangre:**

Específicamente el cloruro de mercurio contenido en algunos antisépticos incrementa el colesterol, por lo que al exponerse a este compuesto puede aumentar el riesgo ateromatoso en patología preexistente de aorta. (Mamani G, 2013)

#### **5.4.7 Hipersensibilidad:**

En exposición a sales de mercurio se puede encontrar, reacción de hipersensibilidad caracterizada por descamación, color rosado de las mejillas y plantas de los pies y manos, fotofobia, sudoración, irritabilidad e insomnio. (Mamani G, 2013)

## **5.5 Falta De Control En El Trabajo y Explotación Infantil**

La informalidad laboral no permite que se realice un control efectivo de las actividades que se realiza la explotación de las minas, según la organización internacional del trabajo la minería ilegal está vinculada a fenómenos de subempleo con deficientes condiciones laborales ya que no tienen ningún tipo de contrato, seguridad social, ni prestaciones sociales.

El trabajo infantil lo inician a temprana edad sin que este sea remunerado haciendo de manera significativa que no accedan a la educación, lo que genera conflicto generacional que se transforma en un notorio factor de violencia.

## **5.6 Actividades Ilícitas**

La minería ilegal normalmente es patrocinada por otras actividades ilícitas como son, la financiación del terrorismo y de las bandas dedicadas a la criminalidad. Ya que es una captación de recursos que carece de un control efectivo del Estado y que, en la actualidad, no es objeto de una represión tan significativa, como sí lo son otras actividades como el narcotráfico. Así, es una fuente de recursos que ofrece dos grandes ventajas: en primer lugar, es rentable, toda vez que genera altos ingresos con escasos costos y, en segundo lugar, no llama tanto la atención como sí lo hacen otras actividades.

# **6 MERCURIO**

## **6.1 Generalidades Del Mercurio**

Se encuentra en la corteza terrestre en una concentración de 0.5ppm, en combinación con azufre, formando más de una docena de compuestos diferentes. De estos compuestos, el más importante de ellos comercialmente, es el sulfuro rojo HgS, conocido como cinabrio, el cual contiene 86.2 % de Hg y 13.8 % de azufre. El metal obtenido puede tener una pureza hasta del 99.9

% y si se desea una pureza mayor, se purifica por destilación múltiple o refinamiento electrolítico.

A partir de este mineral es de donde se obtiene el mercurio metálico, principalmente

Actualmente, sus usos son variados y numerosos, dependen principalmente del aprovechamiento de sus propiedades fisicoquímicas como volumen de expansión, conductividad eléctrica, toxicidad y habilidad para alearse con otros metales. Entre las aplicaciones de este metal se encuentran: como catalizador de oxidaciones orgánicas; en recubrimiento de espejos; en lámparas de arco para generar rayos UV y lámparas fluorescentes; en instrumentos como barómetros, termómetros, hidrómetros y pirómetros; en la extracción de oro y plata de sus minerales; en la generación de amalgamas; en rectificadores eléctricos; en la determinación de nitrógeno por el método Kjeldhal; como reactivo de Millon; como cátodo en electrólisis y electroanálisis; en pilas y en la manufactura de sales de mercurio, productos farmacéuticos, agroquímicos y pinturas. Desde luego muchos de estos usos han sido prohibidos en muchos países debido a su alta toxicidad, por ejemplo, en pesticidas, productos de lavandería, cosméticos y pinturas.

Tanto el mercurio como sus sales tienen una gran resistencia a la biodegradación, por lo que se acumulan creando graves problemas de contaminación ambiental. Es por ello por lo que existen reglamentaciones especiales para el manejo, producción y disposición de desechos, en países industrializados. Los compuestos de mercurio son generalmente coloridos. Pueden ser insolubles en agua y son muy tóxicos por ingestión o inhalación de sus polvos. (Universidad Autónoma de México, S,F)

## **6.2 Características Físicas y Químicas**

- ✓ Color y Forma: Blanco /plateado, móvil /pesado, en estado sólido es blanco – estaño

- ✓ Olor: Sin olor
- ✓ Numero Atómico: 80
- ✓ Valencias: 1 y 2
- ✓ Ubicación Tabla Periódica: IIB
- ✓ Punto de Ebullición: 356. 72 °C
- ✓ Punto de Fusión: - 38.87°C
- ✓ Peso Molecular: 200.59
- ✓ Densidad: 13.534 (25 C), 13.546 (20 C), 14.43 (en el punto de fusión), 14.193 ( a -38.8 C, sólido) y 13.595 (0 C)

***Corrosividad:***

- ✓ La alta movilidad y tendencia a la dispersión del mercurio permite la facilidad de formar aleaciones (amalgamas) con varios metales entre ellos oro, plata

***Solubilidades:***

- ✓  $6.39 \times 10^{-7}$  en el agua a 25°C
- ✓ Soluble en ácido nítrico

***Viscosidad***

- ✓ 1.55mPa.sec a 20°C

***Otras Propiedades***

- ✓ A temperatura ambiente se encuentra puro y no se oxida, pero al calentar cerca de su punto de ebullición lentamente forma HgO.

- ✓ Forma aleaciones con muchos metales, excepto hierro (solo a temperaturas muy altas) y con azufre se combina a temperatura ambiente.
- ✓ Masa dúctil y maleable que puede cortarse con el cuchillo. (Jiménez A, 2005)

### **6.3 TIPOS DE MERCURIO PRESENTES EN EL AMBIENTE**

#### **6.3.1 Mercurio Inorgánico O Metálico (Hg)**

Se encuentra de forma natural en el suelo, pero sus concentraciones se incrementan exponencialmente por actividades antrópicas. El mercurio que se evapora al quemar las amalgamas de oro va a la atmósfera circundante y de allí se precipita en micro-gotitas en un diámetro de hasta 1,5  $\mu$ m, contaminando el suelo el agua, animales, plantas, personas y cosas. En el agua, por su elevada densidad, el mercurio se deposita y acumula en el barro del fondo. (Instituto de investigaciones de la amazonia peruana y Ministerio de ambiente, 2011)

#### **6.3.2 Mercurio Orgánico O Metilmercurio (MeHg)**

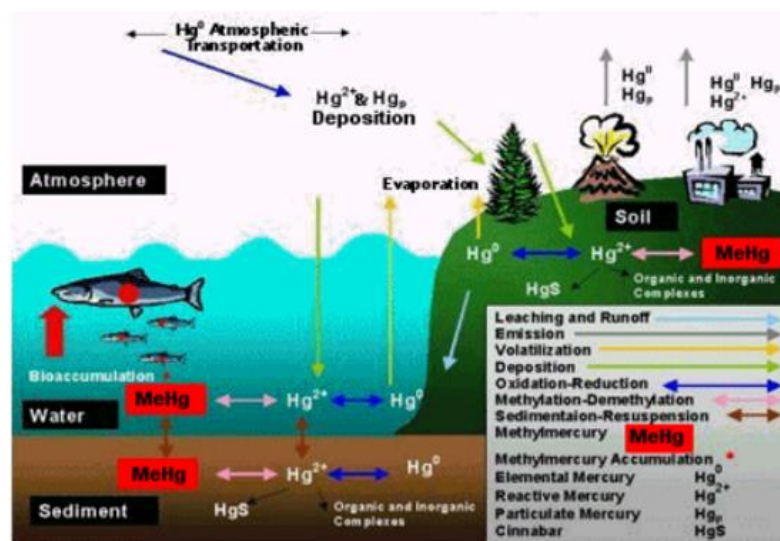
Las bacterias y otros microorganismos transforman el mercurio metálico en metilmercurio en el fondo de los cuerpos de agua y en zonas pantanosas. Los peces y otros pequeños organismos (caracoles, cangrejos, gusanos, etc.), que se alimentan de barro del fondo, ingieren el metilmercurio y lo van acumulando en sus tejidos a lo largo de su vida (bioacumulación). A través de la cadena trófica, los peces, aves, reptiles o mamíferos, incluyendo el hombre, que consumen estos peces y organismos, lo van acumulando en sus músculos y tejidos durante su vida, y al ser comidos por otros, los depredadores finales acumulan más mercurio (biomagnificación). (Instituto de investigaciones de la amazonia Peruana y Ministerio de ambiente, 2011)

## 6.4 Ciclo Del Mercurio

El mercurio no es solo el más tóxico de los metales sino el más intrigante ya que no es esencial para ningún proceso metabólico y se acumula en la mayoría de los seres vivos. Este metal ocurre naturalmente en una variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos, no solo en estado sólido disuelto, sino también en líquido y en fase gaseosa.

La transición de mercurio entre esos compuestos y fases es controlada por una multitud de procesos ambientales, que incluye reacciones fotoquímicas, oxidación y reducción química, transformaciones microbianas y fraccionamiento fisiológico.

El mercurio difiere de otros metales por su carácter orgánico: aparece naturalmente en compuestos organometálicos y tiene alta afinidad por la mayor parte de los tipos de materia orgánica especialmente las proteínas de los organismos ya que los enlaces que establece son de naturaleza covalente y se incrementa de manera considerable por actividades antropogénicas principalmente relacionadas con la minería. (Jiménez A, pg 10-14 2005)



*Imagen 5-Ciclo Del Mercurio En El Medio Ambiente*

*Fuente: (Jimenez A, 2005) Jiménez A (2005) Interacción del mercurio con los componentes de las aguas residuales, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ingeniería y arquitectura, Última consulta: 06 de julio 2018, Disponible en: <file:///C:/Users/hp/Documents/ARCHIVOS%20MONOGRAFIA/caracter%C3%ADsticas%20f%C3%ADsticas%20y%20qu%C3%ADmicas%20del%20mercurio/angelicamariajimenezgomez.2005.pdf>*

## **6.5 Ciclo Local Del Mercurio**

El ciclo del mercurio se basa en la circulación de los compuestos de dimetilmercurio el cual es liberado por actividades antrópicas. En los ecosistemas acuáticos y en presencia de oxígeno casi todas las formas de mercurio pueden oxidarse a  $Hg^{2+}$ .

El dimetilmercurio se reduce para dar mercurio metálico en un ambiente anaeróbico, gracias a los microorganismos, la segunda reacción ocurre en aguas continentales o litorales transformándose el  $Hg^{2+}$  en  $CH_3Hg^+$  (metilmercurio) y en  $CH_3HgCH_3$  (Dimetilmercurio), desarrollándose por vía aerobia o anaerobia.

Cuando el metilmercurio está libre en el agua puede atravesar las membranas biológicas con facilidad el cual se incorpora en las cadenas tróficas, esto se debe a que atraviesa las membranas lipídicas unida a su liposubilidad y a su afinidad por los grupos sulfhídricos de las proteínas siendo muy peligroso para los seres vivos. (Universidad de Granada, s,f)

## **6.6 Ciclo De Biotransformación**

El mercurio es biotransformado, en especial en el agua de los ríos por microorganismos, e incorporado a las cadenas tróficas como metilmercurio, muy tóxico. En la atmósfera, la especie predominante es la de  $Hg^{2+}$ , formada a partir de otras especies de mercurio, como el

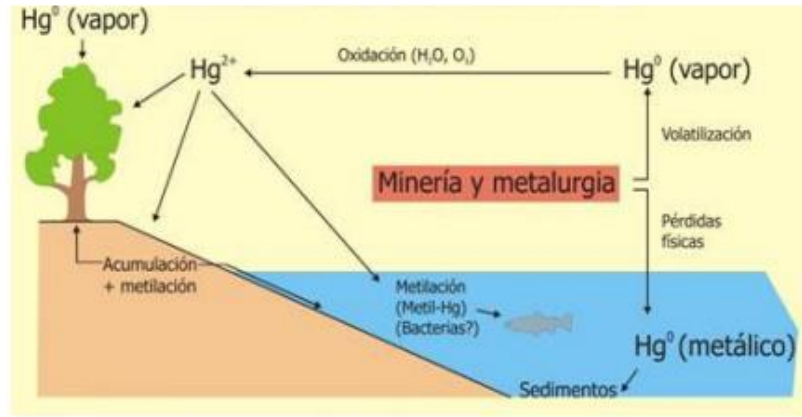
dimetilmercurio, el  $\text{Hg}^0$  o el propio Hg metal, en diferentes procesos químicos; mientras que, en el agua, como hemos dicho, se biotransforma a metilmercurio. (Jiménez A, 2005)

El ciclo acuático de biotransformación la especie predominante es la de  $\text{Hg}^{2+}$ , muy soluble y que puede ser bioacumulado directamente por los peces, o seguir un proceso de biotransformación, realizado por microorganismos acuáticos, dando lugar a dos especies orgánicas, el dimetilmercurio volátil, que se recicla a la atmósfera y el metilmercurio, que se bioacumula en los peces, y por tanto es incorporado a las cadenas tróficas. A su vez, el metilmercurio formado, puede transformarse en  $\text{Hg}^{2+}$ , el cual se oxida a  $\text{Hg}^{2+}$ , siguiendo su ciclo de biotransformación, o en Hg metal, que se deposita en forma de sedimentos. (Jiménez A, 2005)

Se puede establecer las siguientes pautas de comportamiento del mercurio en el agua:

- ✓ Todas las formas de Hg se transforman en  $\text{Hg}^{2+}$  en el agua por reacción con  $\text{O}^0$ . Además, existe  $\text{Hg}^{2+}$  de su propia incorporación por el ciclo del agua.
- ✓ Las especies oxidadas de mercurio se reducen a  $\text{Hg}^0$ , por la acción de bacterias pseudomonas en un proceso anaeróbico, y se sedimenta.
- ✓ El  $\text{Hg}^{2+}$  se metila en aguas continentales o litorales, bien por metilación aeróbica en numerosos microorganismos y bacterias, producida por metilación del complejo homocisteína-Hg en los procesos celulares que normalmente producen metionina, o por metilación anaerobia de bacterias metanogénicas o por derivados de metilcobalamina. Un esquema básico de este último tipo de metilaciones (Doadrio A, sf)

- ✓ En el caso del mercurio atmosférico se puede incorporar fácilmente a los sistemas orgánicos así: el  $\text{Hg}^0$  se deposita en los vegetales directamente respirado por los vegetales o los seres vivos



**Imagen 6-Ciclo De Biotransformación Del Mercurio**

Imagen extraída de: (Universidad de Granada s,f ) Universidad de Granada (s,f) Química inorgánica ambiental, Tema 3, Metales pesados tóxicos: El mercurio, Última consulta: 06 de julio 2018, Disponible en: [http://www.ugr.es/~mota/QIA\\_TEMA-3\\_Hg.pdf](http://www.ugr.es/~mota/QIA_TEMA-3_Hg.pdf)

Según Jiménez A, 2005 El mercurio, presenta tres estados diferentes de oxidación  $\text{Hg}^0$ , o mercurio metálico,  $\text{Hg}_2^{2+}$  como ion mercurioso y  $\text{Hg}^{2+}$  como ion mercúrico: En las aguas superficiales en condiciones anaerobias predominan el  $\text{Hg}(\text{OH})_2$  y  $\text{HgCl}_2$ ; de todas formas las reacciones del mercurio con los compuestos orgánicos son complejas pueden sintetizar en los siguientes puntos:

1. Las bacterias aerobias y anaerobias transforman  $\text{Hg}^{2+}$  en metilmercurio (el compuesto más peligroso).

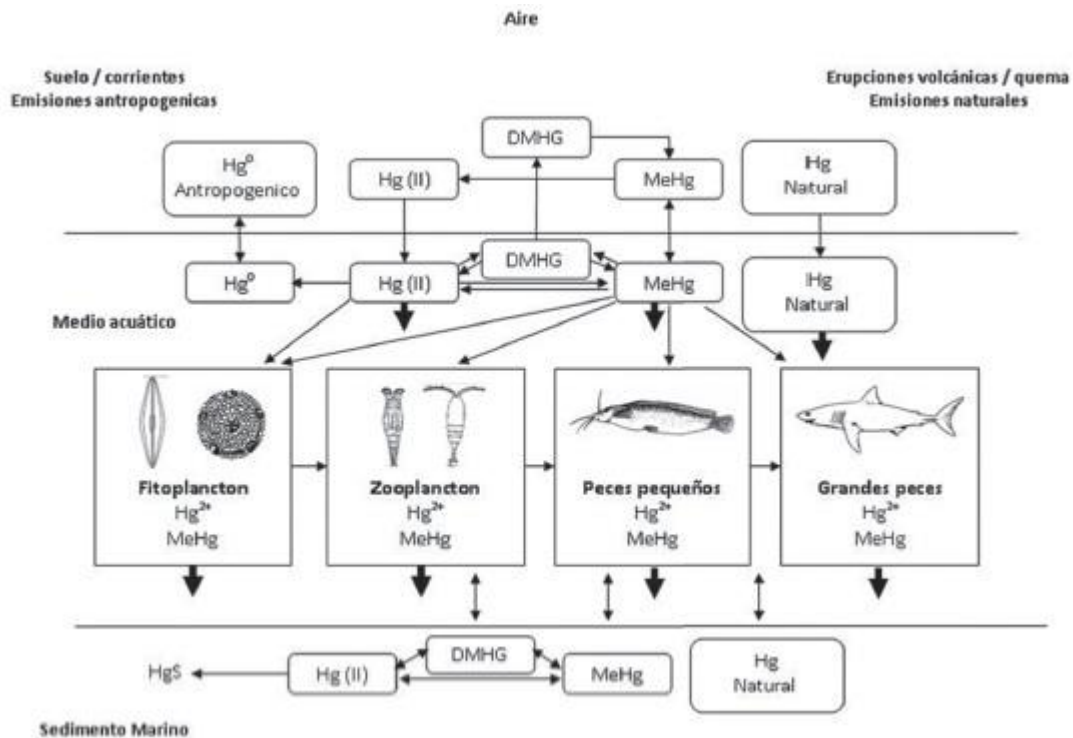
2. Los microorganismos pueden volver a metilar el metilmercurio volviéndolo dimetilmercurio. Este último puede transformarse en  $\text{Hg}^0$  por la acción de bacterias productoras de metano.
3. En condiciones anaerobias, donde normalmente se forma  $\text{H}_2\text{S}$ , es frecuente la aparición de  $\text{HgS}$  se transforma en  $\text{HgSO}_4$  que fácilmente se disocia produciendo  $\text{Hg}^{2+}$ .
4. En pH ácido y en presencia de  $\text{Hg}^{2+}$  el dimetilmercurio se transforma en metilmercurio.
5. El metilmercurio en presencia de grupos  $-\text{SH}$  puede descomponerse por fotólisis en metano y  $\text{HgS}$ .
6. De igual forma puede formarse fenilmercurio y difenilmercurio.

La sustancia más tóxica y que reviste mayor peligro es el metilmercurio, ya que tiene la capacidad de disolverse en los lípidos afectando al ser humano.

En cuanto a la solubilidad en el agua difiere mucho de un compuesto a otro y aumenta en el siguiente orden:

Cloruro mercurioso  $\longrightarrow$  mercurio elemental  $\longrightarrow$  Cloruro de metilmercurio  $\longrightarrow$

Cloruro mercúrico. ((Jiménez A, 2005)



**Imagen 7- Transformación Del Mercurio En Medio Acuático**

Fuente: (León, y Peñuela 2011) León D, Peñuela G, (2011) *Trascendencia del metilmercurio en el ambiente, la alimentación y la salud Humana*, Última consulta: 14 de julio 2018, Disponible en:

<http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/135/69>

## **FITORREMEDIACIÓN**

Es un conjunto de tecnologías que reducen *in situ* o *ex situ* la concentración de diversos compuestos a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas.

La fitorremediación utiliza las plantas para remover, reducir, transformar, mineralizar, degradar, volatilizar o estabilizar contaminantes (Kelley *et al*, 2000; Miretzky *et al.*, 2004; Cherian y Oliveira, 2005). Se han identificado una amplia diversidad de especies que se emplean para este

fin. Algunas de ellas, debido a su gran capacidad para acumular metales pesados, reciben el nombre de hiperacumuladoras.

De acuerdo con Akpor *et al* 2012, El proceso de fitorremediación depende del grado de contaminación, la disponibilidad del contaminante, así como de la interacción de la planta con su hábitat (suelo y microorganismos) Es una tecnología que puede aplicarse in situ para tratar una gran variedad de contaminantes, gracias a la capacidad de absorción de las raíces de las plantas .En el caso de metales pesados, luego de que estos son absorbidos por las plantas, pueden ser extraídos de la biomasa cosechada y ser reciclados (Paz-Ferreiro *et al*, 2014).

Para la implementación de estas fitotecnologías, se requiere analizar criterios como la tolerancia y bioacumulación del metal por parte de la planta; así como variables que incluyen la concentración del metal, el pH, el contenido de nutrientes y la materia orgánica disponible (Garbisu y Alkorta 2003; Li *et al*, 2003; Solisio *et al*, 2006; Wu *et al*, 2010; Paz-Ferreiro *et al*, 2014).

De igual forma esta tecnología se hace más efectiva a través de la manipulación genética, lo que mejora la capacidad de remediación de las plantas (Cherian y Oliveira; 2005). Se han diseñado especies vegetales con una mayor capacidad de degradación de contaminantes orgánicos o de acumulación de metales pesados. (Delgadillo, A, González A, Prieto F, Villagómez J, & Acevedo O. 2011).

## **6.7 Plantas Metalófitas O Hiperacumladoras**

Son plantas capaces de crecer en el suelo o agua con grandes concentraciones de metales pesados y se caracterizan por extraer el metal a través de sus raíces y concentrarlo hasta niveles extremadamente altos en sus tejidos (Chaney *et al*, 2007). Estas plantas presentan un rápido

crecimiento, amplios rangos de adaptación climática y la capacidad de absorber grandes volúmenes de agua (en relación con otras especies), lo que les permite manejar grandes cantidades de contaminantes disueltos, así como limitar la cantidad de agua que escapa más allá de la zona contaminada y que limita la dispersión de la contaminación (Maiti et al, 2004; Kavamura y Esposito, 2010).

Las metalófitas son plantas que pueden acumular metales de 100 a 500 veces más que otras especies, alcanzando niveles de remoción hasta del 100% (Chaney et al, 2007). Más de 400 especies vegetales han sido identificadas como hiperacumuladoras.

El desarrollo de adaptaciones fisiológicas y bioquímicas por parte de las plantas incluyen el control en la acumulación del contaminante en las raíces y la traslocación de éste a los diferentes órganos vegetativos (McGrath et al, 2001; Padmavathiamma y Li, 2007; Ücüncü et al, 2013). Estos procesos de bioacumulación permiten transformar los contaminantes en productos menos tóxicos o no tóxicos, minimizando su exposición en el ambiente (Favas et al, 2012; Dos Santos y Lenzi, 2000; Mane et al, 2011).

Las plantas pueden inmovilizar los metales en sus vacuolas para evitar la translocación a la parte aérea, siendo consideradas como el lugar de mayor acumulación de metales pesados en células vegetales. La compartimentalización de las vacuolas es efectiva controlando la distribución y concentración de iones de metales, debido a que las otras partes de la célula no tienen acceso a los iones metálicos peligrosos y de esa forma la planta no se afecta (Wu et al, 2010).

La habilidad de acumular metales pesados varía significativamente entre especies, cada una desarrolla diferentes mecanismos para transformar los iones, según sus características morfológicas, fisiológicas y genéticas. Numerosas especies fitorremediadoras se encuentran

taxonómicamente dentro de los órdenes Brassicales, Asterales, Solanales, Poales, Malpighiales, Fabales, Caryophyllales y Rosales (Paz-Ferrerira et al, 2014).

## **6.8 Transporte De Contaminantes Orgánicos En Las Plantas**

Según Delgadillo, González, Prieto, Villagómez, & Acevedo. Algunas plantas tienen la capacidad para metabolizar o acumular compuestos orgánicos y Los microorganismos que habitan en la rizosfera juegan un papel importante en la degradación de la materia orgánica. Los metabolitos generados de esta degradación son absorbidos por las plantas junto con nitrógeno, fósforo y otros minerales (Garbisu *et al*, 2007).

La atracción electrostática entre las cargas eléctricas de las raíces de las plantas con las cargas opuestas de partículas coloidales, las cuales se adhieren a la superficie de la raíz donde son absorbidas y transportadas a las partes aéreas donde se metabolizan o volatilizan. El tipo de planta y las propiedades físicas y químicas de estos compuestos son parámetros importantes que determinan el destino de los contaminantes (Eapen *et al.*, 2007).

Para la fitorremediación de contaminantes orgánicos se toma en cuenta los siguientes aspectos:

- 1) el metabolismo de los contaminantes al interior y al exterior de la planta (rizosfera),
- 2) los procesos que conducen a la completa degradación de los contaminantes (mineralización),
- 3) la absorción de los contaminantes (Reichenauer y Germida, 2008).

Las plantas metabolizan los compuestos orgánicos a través de tres pasos secuenciales:

**Fase I.** Involucra la conversión/activación (oxidación, reducción e hidrólisis) de los compuestos orgánicos lipofílicos (Komives y Gullner, 2005).

**Fase II.** Permite la conjugación de los metabolitos de la fase I a una molécula hidrofílica endógena como los azúcares, aminoácidos y glutatona (Diet & Schnoor, 2001).

**Fase III.** Promueve la compartimentalización de los compuestos orgánicos modificados en las vacuolas o formación de enlaces con los componentes de la pared celular como la lignina y la hemicelulosa. Las enzimas, en la planta, que catalizan la primera fase de las reacciones son las monoxigenasas P450 y las carboxilesterasas. De la segunda fase, en la que ocurre la conjugación por enzimas como la glutatona S-transferasa, resulta la formación de compuestos solubles y polares. La tercera fase del metabolismo de la planta es la compartimentalización y almacenamiento de los metabolitos solubles en las vacuolas o en la matriz de la pared celular. La glutatona S-conjugasa es la encargada de este proceso (Cheriany Oliveira, 2005).

## **6.9 Transporte De Contaminantes Inorgánicos En Las Plantas**

Los metales pesados son aquellos elementos químicos que presentan una densidad igual o superior a  $5 \text{ g/cm}^3$  cuando están en forma elemental o cuyo número atómico es superior a 20 (Vardanyan y Ingoles, 2006). Muestran una elevada tendencia a bioacumularse y a biomagnificarse a través de su paso por los distintos eslabones de las cadenas tróficas. En concentraciones elevadas, ocasionan graves problemas en el desarrollo, crecimiento y reproducción de los seres vivos (Roy *et al.*, 2005).

Los mecanismos de tolerancia varían entre las distintas especies de plantas y están determinados por el tipo de metal, eficiencia de absorción, traslocación y secuestro. Las fases del

proceso por el cual las plantas incorporan y acumulan metales pesados son las siguientes: (Navarro-Aviño, 2007):

**Fase I.** Implica el transporte de los metales pesados al interior de la planta y, después, al interior de la célula. La raíz constituye el tejido de entrada principal de los metales, los cuales llegan por difusión en el medio, mediante flujo masivo o por intercambio catiónico. La raíz posee cargas negativas en sus células, debido a la presencia de grupos carboxilo, que interaccionan con las positivas de los metales pesados, creando un equilibrio dinámico que facilita la entrada hacia el interior celular, ya sea por vía apoplástica o simplástica (Navarro-Aviño, 2007).

**Fase II.** Una vez dentro de la planta, las especies metálicas son secuestradas o acomplejadas mediante la unión a ligandos específicos. Entre los quelantes producidos por las plantas se encuentran los ácidos orgánicos (ácidos cítrico, oxálico y málico), algunos aminoácidos (histidina y cisteína) y dos clases de péptidos: fitoquelatinas y metaloteínas.

Las fitoquelatinas son ligandos de alta afinidad que tienen como sustrato al glutatión. Están constituidas básicamente por 3 aminoácidos: ácido glutámico, cisteína y glicina, unidos por enlaces peptídicos.

Las metalotioneinas son polipéptidos de unos 70-75 aminoácidos con un alto contenido en cisteína, aminoácido capaz de formar complejos con cationes mediante el grupo sulfidrilo. Tienen una marcada afinidad por las formas iónicas de Zn, Cd, Hg y Cu.

**Fase III.** Involucra la compartimentalización y detoxificación, proceso por el cual, el complejo ligando-metal queda retenido en la vacuola.” (Delgadillo, A, González A, Prieto F, Villagómez J, & Acevedo O. 2011).

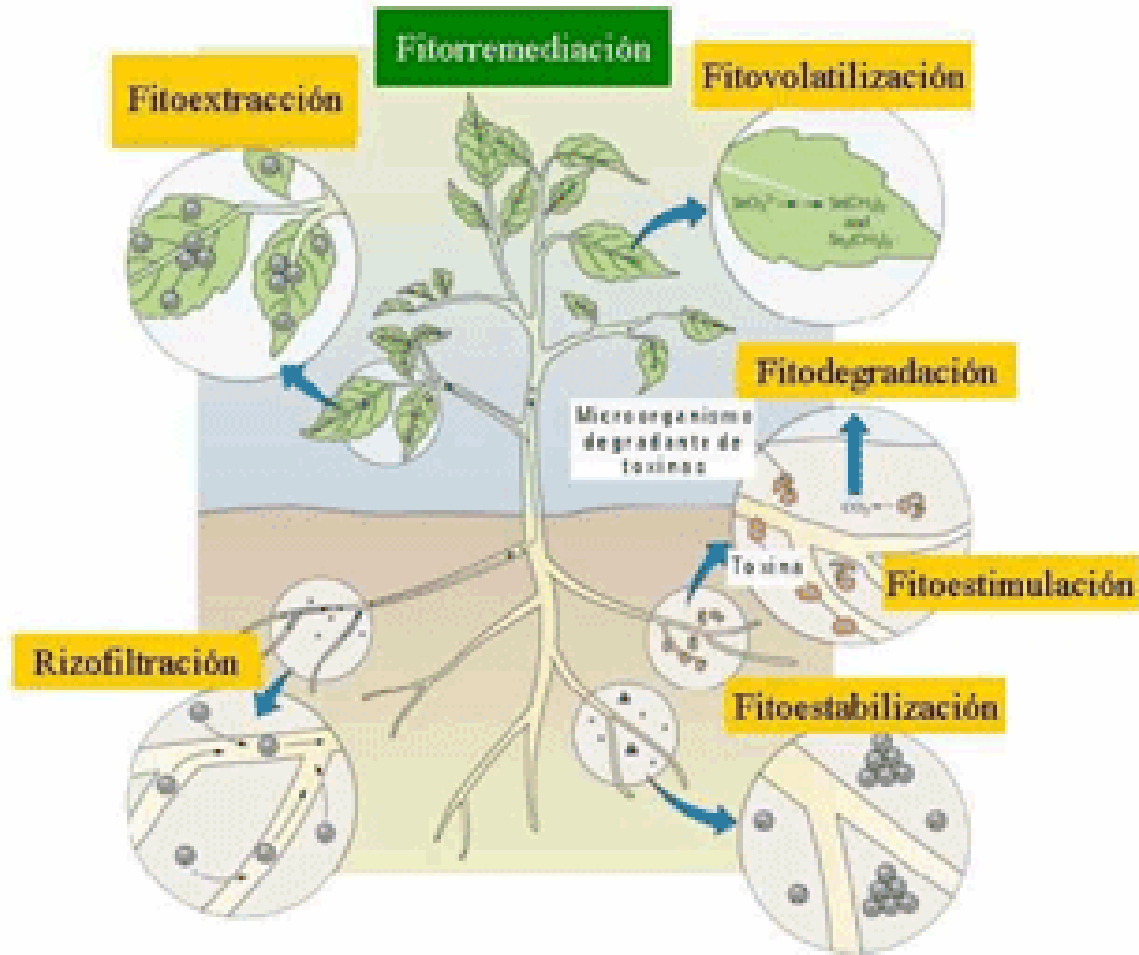
## 6.10 Técnicas De Fitorremediación

*Tabla 3-Técnicas De Fitorremediación*

<b>TÉCNICA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Fitoextracción</b>	Es la absorción del contaminante por la raíz el cual es almacenado y acumulado dentro de la biomasa. Incluye el uso de plantas hiperacumuladoras para remover contaminantes del suelo; el material acumulado en la planta puede disponerse o quemarse para recuperar el metal pesado. Es una estrategia que depende de la habilidad natural de algunas plantas de acumular, traslocar y resistir altas cantidades de metales durante todo su ciclo de crecimiento.
<b>Fitofiltración</b>	Secuestro y captura de contaminantes por plantas acuáticas a través de las raíces de la planta o algunas semillas, se usa principalmente para remover metales pesados de aguas contaminadas.
<b>Fitoestabilización</b>	Durante este proceso las raíces de las plantas absorben los contaminantes del suelo y lo almacenan en la rizósfera, pueden incorporarlo a la lignina o en el humus disminuyendo la posibilidad de contaminación. Esto permite la limitación de la movilidad y biodisponibilidad de contaminantes por mecanismos de prevención por migración e inmovilización

<b>Fitovolatilización</b>	Conversión de contaminantes a partículas volátiles, se da cuando algunos de los elementos de los grupos II, V y VI de la tabla periódica como el Hg son absorbidos por la raíz, convertidos a formas menos tóxicas y liberados al exterior a través del follaje. Al convertir los iones metálicos a su estado volátil, algunas especies de plantas evitan el daño causado por la acumulación duradera de metales pesados.
<b>Fitodegradación</b>	Degradación o mineralización de contaminantes orgánicos gracias a la actividad enzimática específica de la planta, puede utilizar asociaciones de microorganismos para degradar contaminantes orgánicos.
<b>Rizodegradación</b>	Degradación de xenobióticos orgánicos en la rizósfera de la planta.
<b>Rizofiltración</b>	Mecanismo en el que se usan plantas terrestres para absorber contaminantes precipitados y concentrados en un sistema acuoso.
<b>Fitodesalinización</b>	Remoción del exceso de sales de suelos salinos por halófitos.
<b>Fitoestimulación</b>	Mecanismo en donde la raíz en crecimiento promueve el desarrollo de microorganismos rizosféricos capaces de degradar el contaminante, usando los exudados radiculares como fuente de carbono.

**Fuente:** Beltrán M, Gómez A (2016) Biorremediación de Metales Pesados Cadmio (Cd), Cromo (Cr) Y Mercurio (Hg) Mecanismos Bioquímicos E Ingeniería Genética: Una Revisión



**Imagen 8-Tipos De Fitorremediación Donde Se Indica La Zona De La Planta Donde Ocurre El Proceso**

Fuente: (Porque Biotecnología, 2007) – Porque Biotecnología (2007) Tipos de fitorremediación donde se indica la zona de la planta donde ocurre el proceso , Cuaderno 18, Recuperado en 22 de julio de 2018 Disponible en: <http://www.porquebiotecnologia.com.ar/index.php?action=cuaderno&opt=5&tipo=1&note=18>

## **6.11 Mecanismos Bioquímicos De Fitorremediación De Metales Pesados**

### ***6.11.1 Metal-Proteínas O Metalotioneínas***

Las plantas hiperacumuladoras presentan mecanismos bioquímicos para el transporte y acumulación de metales pesados, los cuales se realizan gracias a proteínas transportadoras de las células que se unen y trasladan el ión desde el espacio extracelular hacia el interior de las células. En la planta este proceso se da fundamentalmente en la savia del xilema desde la raíz hasta las hojas, con la participación de ligandos como citrato, nicotilamina, histidina y asparagina, de esta forma los metales llegan al apoplasto de las hojas donde son eliminados o transformados por las células foliares. (Riasco N, 2011 & Beltrán M, Gómez A, 2016)

Algunos mecanismos desarrollados por las plantas expuestas a metales pesados involucran proteínas capaces de hacer conexión con los metales, formando estructuras bioquímicas complejas llamadas metal-proteínas o metalotioneínas; sin embargo, estos complejos no son exactamente proteínas, son péptidos. Otras proteínas con capacidad de unirse a metales son empleadas en el almacenamiento de estos, junto con proteínas integradas en canales transmembranales (Maiti et al, 2004). En el estudio realizado por Wu et al, (2010) se indica que los metales pesados que mejor inducen la síntesis de metalotioneínas son Cd, Ag, Bi, Pb, Zn, Cu, Hg y Au. (Beltrán M, Gómez A, 2016)

Las metalotioneínas son responsables de la regulación interna de micronutrientes esenciales como el Zn o el Cu y además permiten la protección de la célula ante efectos tóxicos debido a la elevada concentración de iones y metales pesados como Cd, Hg, entre otros. Este grupo de moléculas ha sido empíricamente clasificado en tres clases: Clase I, incluye todas las metalotioneínas que tienen los residuos de cisteína son localizados en posición similar a la que se

presenta en plantas y algunos mamíferos, no tienen aminoácidos aromáticos o histidinas; la Clase II originalmente proviene de las levaduras como *Candida albicans* o cianobacterias y la Clase III son polipeptidos atípicos compuestos por unidades de glutamil-cisteina (Maiti et al, 2004 & Beltrán M, Gómez A, 2016)

### **6.11.2 Quelación**

Es considerada como una herramienta para la extracción de metales pesados en las plantas. Este proceso juega un rol esencial no solo en la acumulación y transporte de metales pesados, sino también en la fase de detoxificación. Usualmente los quelantes contienen ligandos (como la histidina y citrato) que pueden unirse a iones metálicos; cuando esto ocurre, los metales combinados pierden su carga y son incapaces de reaccionar con otras sustancias haciendo que el daño a la célula disminuya (Wu et al, 2010).

Ciertos agentes quelantes facilitan la toma del metal del suelo a la planta, a través del tonoplasto y las vacuolas protegiendo la actividad celular de la toxicidad de metales pesados. Este método, ampliamente utilizado demuestra la capacidad de las plantas para tolerar altos niveles de metales pesados sin causar un efecto deletéreo sobre sus funciones metabólicas (Hernández M, González J. & López D. 2004).

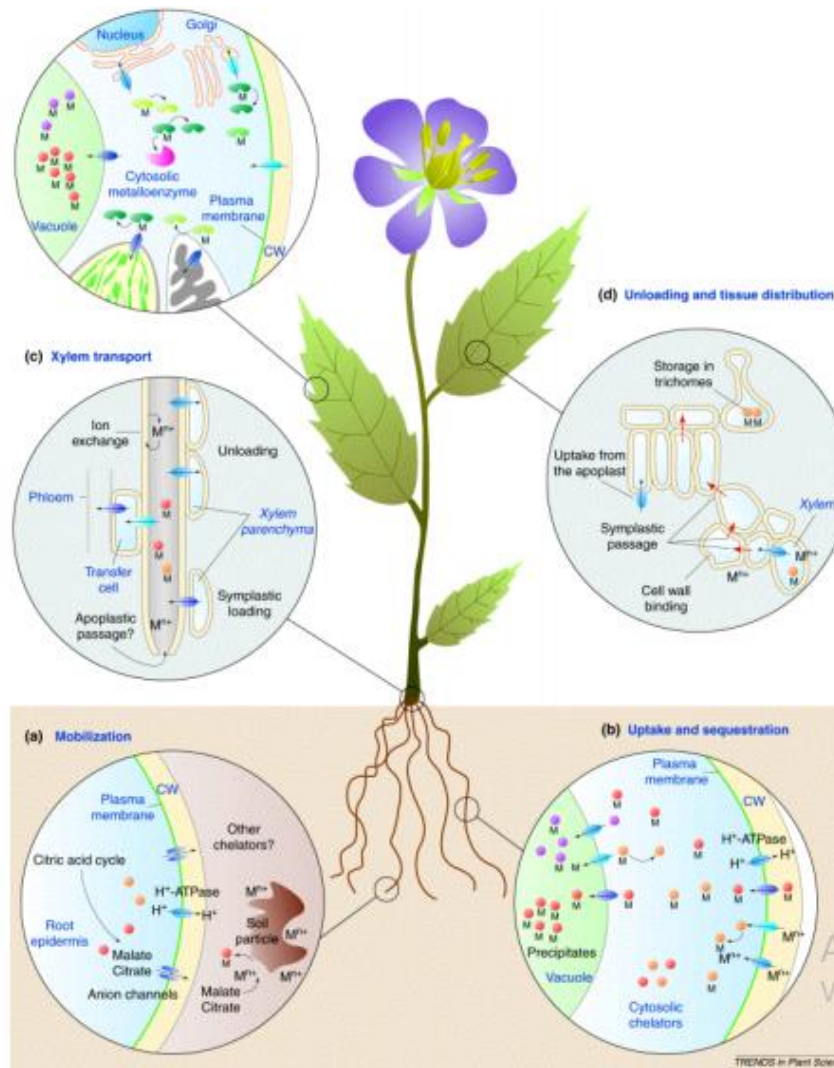
Dentro de los agentes quelantes más reconocidos están varios ácidos orgánicos (ácido málico y ácido cítrico) que han sido identificados como agentes positivos para acelerar la absorción de metales pesados por la raíz, esos mecanismos son aún más notables en el transporte raíz-brote (Hernández M, González J. & López D. 2004).

## 6.12 Dinámica De La Acumulación De Los Metales En Las Plantas

*“Mecanismos moleculares propuestos para participar en la acumulación de metales en las plantas.*

- a) *Los iones metálicos se movilizan por secreción de quelantes y por acidificación de la rizosfera.*
- b) *La absorción de iones de metal hidratados o complejos de quelato de metal está mediada por varios sistemas de absorción residiendo en la membrana plasmática. Dentro de la celda, los metales son quelados y el exceso de metal es secuestrado por el transporte a la vacuola.*
- c) *Desde las raíces, los metales de transición se transportan al vástago a través del xilema. Presumiblemente, la porción más grande alcanza el xilema a través del symplast de raíz. Paso apoplástico podría ocurrir en el extremo de la raíz. Dentro del xilema, los metales están presentes como iones hidratados o como quelatos de metales complejos.*
- d) *Después de alcanzar el apoplasto de la hoja, los metales son capturados diferencialmente por diferentes tipos de células foliares y moverse de célula a célula a través de plasmodesmata. El almacenamiento parece ocurrir preferentemente en tricomas.*
- e) *La captación en las células de la hoja nuevamente es catalizada por varios transportadores [no representados en (e)]. La distribución intracelular de los metales esenciales (= tráfico) está mediada por metaloperonas y transportadores localizados en endomembranas (tenga en cuenta que estos procesos función en cada celda).*

*Abreviaturas y símbolos: CW, pared celular; M, metal; círculos llenos, quelantes; óvalos llenos, transportadores; estructuras en forma de frijol, metaloaperones”. (Clemens, S, Palmgren M & Kramer U ,2002)*



**Imagen 9- Dinámicas De Acumulación De Mercurio En Las Plantas**

Fuente: ( Clemens,S, Palmgren M & Kramer U 2002) Clemens, S, Palmgren M & Kramer U ,(2002) A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation, Trends in Plant Science Vol.7 No.7 July 2002, Recuperado el 22 de Julio de 2018, de: [http://arquivo.ufv.br/DBV/PGFVG/BVE684/htms/pdfs\\_revisao/Molecularplantnutrition/understanding%20and%20engineering%20plant%20metal%20accumulation.pdf](http://arquivo.ufv.br/DBV/PGFVG/BVE684/htms/pdfs_revisao/Molecularplantnutrition/understanding%20and%20engineering%20plant%20metal%20accumulation.pdf)

## **6.13 Plantas Genéticamente Modificadas Para Remoción De Mercurio**

La utilización de técnicas de ingeniería genética ha venido en aumento debido a que algunas de las plantas hiperacumuladoras naturales no satisfacen las necesidades de remoción debido a su bajo crecimiento, su baja producción de biomasa y su demanda de nutrientes debido a las condiciones de crecimiento (Wu et al, 2010). Algunos científicos han empleado técnicas de ingeniería genética mostrando buenos resultados ya que el mejoramiento genético puede contribuir a optimizar las tecnologías utilizadas en procesos de descontaminación, el uso de la genómica, proteómica y la metabolómica puede proveer información acerca de las rutas metabólicas, con el fin de identificar genes, proteínas o metabolitos involucrados en la tolerancia u oxidación de los metales (Kavaruma y Esposito, 2010).

### ***6.13.1 Proceso Para Transformar Una Planta Genéticamente***

Según Díaz *et al.* (2004), para obtener una planta transgénica deben ocurrir tres procesos indispensables en la misma célula:

1. el casete de expresión debe ser transferido al interior de la célula;
2. el casete de expresión se debe integrar al DNA celular
3. y regenerar una planta, a partir de la célula en la que han ocurrido los dos procesos anteriores.

Para todas las técnicas de transformación vegetal es necesario disponer de un gen de interés, que puede ser endógeno modificado o un gen foráneo aislado de grupos filogenéticos variados. cómo se citó en Díaz C, Chaparro A 2012 (Karimi *et al.* 2007). Este debe ir flanqueado por los elementos reguladores necesarios para su expresión: una región promotora, cuya función general

es el reconocimiento del sitio de unión de la DNA polimerasa con el consecuente inicio de la transcripción del gen en RNA mensajero y una región terminadora que da la señal de finalización de la transcripción, y es la encargada del mantenimiento de la estabilidad del mRNA y su transporte al citoplasma para su posterior traducción en una molécula proteica. Esta construcción Región promotora - Región codificante o gen de interés - Región terminadora, es conocida como casete de expresión, como se citó en Diaz C, Chaparro A 2012 (Sharma *et al.* 2002; Chaparro *et al.* 2005).

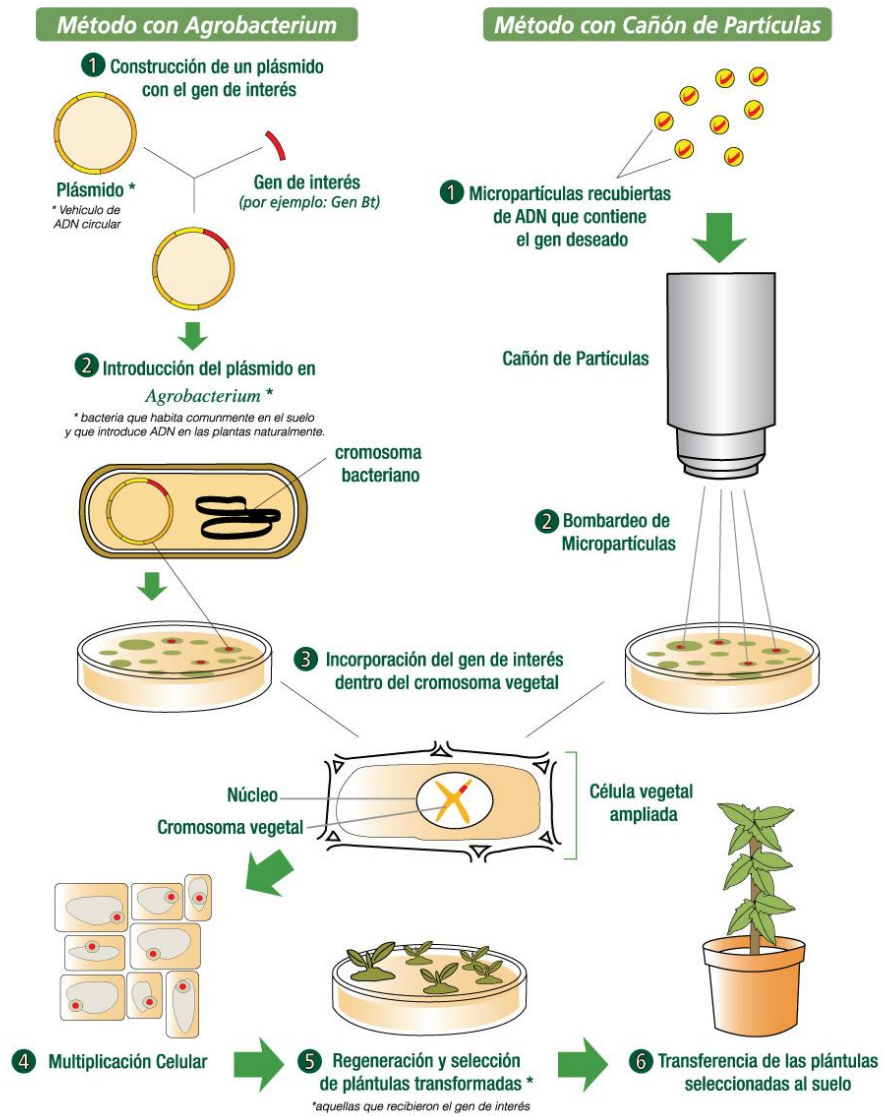
La fuente de los segmentos génicos que componen el casete de expresión puede corresponder a orígenes biológicos diferentes, caso en que se denomina construcción quimérica. Este casete de expresión debe ir en un vector que permita su clonación o transferencia, mediante los métodos de transformación. Los vectores más utilizados en la transformación de plantas son plásmidos, donde fueron clonados los genes que serán introducidos en el genoma vegetal.

Como se citó en Diaz C, Chaparro A 2012 (Larik *et al.* 2004; Job, 2002; Karimi *et al.* 2007). La construcción quimérica, usualmente, se encuentra acompañada con otra construcción funcional, que corresponde a un gen marcador de selección. La introducción de este gen responde a la necesidad de identificar las plántulas que hayan sido regeneradas, a partir de células que insertaron el transgen dentro del conjunto del material vegetal sometido al proceso de transformación (Bhat & Srinivasan, 2002; Martínez *et al.* 2004; Karimi *et al.* 2007).

Los métodos de transformación utilizados, en la actualidad, se basan en la obtención de células transgénicas y posterior recuperación de plantas completas y fértiles, a través del cultivo de tejidos y selección *in vitro*. En la mayoría de especies, se observa una importante influencia del genotipo en la respuesta al cultivo *in vitro*. Por ello, cuando se usa esta tecnología, con fines de mejoramiento genético es muy importante conocer la respuesta morfogenética de los distintos

genotipos. Cómo se citó en Diaz C, Chaparro A, 2012 (Eapen, 2008; Gutiérrez *et al.* 2002; Filipecki & Malepszy, 2006).

Una vez se logra la regeneración de las plantas transgénicas a partir de células transformadas, se debe realizar la verificación del estatus transgénico de estas plantas, mediante el uso de técnicas moleculares, como PCR o "Southern blot", para determinar la inserción del transgen, RT-PCR o "Northern blot", para verificar su transcripción y "Western Blot" o ELISA, para detectar la producción de la proteína (Díaz *et al.* 2004; Danilova, 2007).



**Imagen 10-Diseño De Un Cultivo Genéticamente Modificado**

Fuente:( Porque Biotecnología 2007) Porque Biotecnología (2007) Transformación genética de las plantas, Cuaderno 18, Recuperado en 22 de julio de 2018 Disponible en: <http://www.porquebiotecnologia.com.ar/index.php?action=cuaderno&opt=5&tipo=1&note=18>

### **6.13.2 Vector Genético**

Es una molécula de ADN que proviene de una célula donadora y se introduce artificial o naturalmente en una célula receptora incorporándose en su propio material genético, de este modo la información que contiene dicha molécula de ADN puede codificar para expresarse en esta nueva célula produciendo las proteínas o realizando las funciones para las que esta molécula estaba codificada originalmente en la célula donadora.

Los vectores de clonación son moléculas transportadoras que transfieren y replican fragmentos de ADN que llevan insertados mediante técnicas de ADN recombinante. Para que sirva de vector, una molécula debe de ser capaz de replicarse junto con el fragmento de ADN que transporta, también debe presentar secuencias de recombinación que estas permitan la inserción del fragmento de ADN a clonar. La clonación dependiente de células para fragmentos de ADN de diferentes tamaños es facilitada por una amplia variedad de sistemas de vectores. . (Mancilla L 2016)

### **6.13.3 Plásmido**

Son secuencias de ADN extra cromosómicas que tienen una capacidad de reproducirse automáticamente, y de pasar de una célula los plásmidos llevan consigo genes en grado de conferir particularidades fenotípicas a las bacterias que los contienen, los plásmidos se utilizan para clonar fragmentos pequeños de DNA en bacterias. (Mancilla L, 2016)

### **6.13.4 Operon Gen MerA**

La enzima central en el sistema de desintoxicación de mercurio microbiano es la proteína reductasa de mercurio (MerA), que cataliza la reducción de Hg (II) a Hg volátil (0). Además de

MerA, los operones codifican las proteínas implicadas en la regulación, la unión a Hg y la degradación de organomercurio. Los enfoques mediados por Mer han tenido amplias aplicaciones en la biorremediación de ambientes contaminados con mercurio y corrientes de desechos industriales.

Algunas bacterias aeróbicas y arqueas han desarrollado mecanismos de resistencia que funcionan para degradar compuestos de organomercurio y para reducir la concentración local de Hg inorgánico ( $\text{Hg}^{+2}$ ) por reducción a  $\text{Hg}^0$  gaseoso, dividiendo eficazmente  $\text{Hg}^{(0)}$  a la fase gaseosa. y permitiendo el crecimiento microbiano (Barkay et al., 2003 ; Lin et al., 2012 ). El sistema de resistencia Hg (*mer*) está codificado por el *meroperón* que consiste en la enzima disulfuro oxidoreductasa homodimérica dependiente de flavina mercúrico reductasa (MerA) y que también puede codificar para la órgano mercurio liasa (MerB), una proteína barredora periplasmática de  $\text{Hg}^{+2}$  (MerP), una o más proteínas que atraviesan la membrana interna (MerT , Merc, Mere, MERF, Merg) que el transporte  $\text{Hg}^{+2}$  al citoplasma donde se reduce por mera, y una o dos proteínas reguladoras (Merr, MERD; La expresión global de *mer* está regulada por MerR, que actúa como un represor transcripcional o activador en ausencia y presencia de  $\text{Hg}^{+2}$  respectivamente. Además, varias proteobacterias codifican para MerD que funciona para regular por disminución la expresión del operón (Barkay et al., 2003 ; Lin et al.,2012 )

## 6.14 Características De Las Técnicas Mas Usadas De Transformación Vegetal

*Tabla 4-Técnicas Más Usadas De Transformación Vegetal*

<b>MÉTODO DE TRANSFORMACIÓN</b>	<b>CARACTERISTICAS</b>
Agrobacterium Tumefaciens, Agrobacterium Rhizogenes	<p>Emplea a la bacteria <i>Agrobacterium tumefaciens</i> o <i>Agrobacterium rhizogenes</i>, las cuales se consideran los ingenieros genéticos de la naturaleza. La bacteria contiene un elemento genético fuera de su cromosoma, denominado plásmido Ti. Un segmento se transfiere de manera estable a los cromosomas de la planta con la que se cocultiva. Los genes de interés biotecnológico se introducen en el plásmido Ti para que ahora la bacteria lo transfiera a la planta.</p> <p>Su rango de hospedantes se ha extendido con protocolos bien desarrollados para plantas dicotiledóneas y algunas monocotiledóneas. Este sistema tiene la capacidad para transferir segmentos grandes e intactos de ADN con bajo número de copias e integración estable. El análisis de plantas genéticamente transformadas por este método ha mostrado gran estabilidad en la presencia del transgen en su sitio original de inserción, así como en la expresión de su mRNA y en la proteína o enzima que produce. El comportamiento del gen es de tipo mendeliano, el cual se segrega a la progenie como cualquier otro gen presente en el organismo receptor.</p>

Biobalística	<p>Técnica de transformación genética ampliamente usada. Emplea micropartículas de oro o tungsteno cubiertas del ADN de interés, las cuales son aceleradas a alta velocidad a los tejidos blanco. El ADN introducido es capaz de alcanzar el núcleo e insertarse de manera estable. Es también posible insertar secuencias en cloroplastos o mitocondrias para la expresión en estos organelos de las proteínas de interés. Esta capacidad de transformación de organelos es muy deseable en la generación de organismos recombinantes sobreproductores de proteínas o enzimas. Algunas desventajas incluyen la baja eficiencia de transformación y se ha reportado silenciamiento del transgen por inserciones multicopia.</p>
<p>Transferencia Directa De Genes A Protoplastos</p>	<p>Este es un método alternativo, en el cual las paredes celulares son removidas por enzimas hidrolíticas, generando así protoplastos que se permeabilizan y ponen en contacto con ADN recombinante. El material genético entra a la célula por este método y posteriormente se promueve su división celular y su regeneración a tejido fotosintético. De manera paralela, se ha empleado la electroporación. Esta consiste en incubar protoplastos con el ADN de interés y permitir el paso de una corriente eléctrica que generará una ruptura de su potencial de membrana por milisegundos; tiempo en el cual se introduce el material genético al citoplasma. Posteriormente, el ADN es movilizado al núcleo para su posible inserción en algún cromosoma. El factor limitante de estas técnicas radica en la regeneración del tejido a planta</p>

	completa. Adicional a su regeneración se debe analizar si la planta será fértil.
Microinyección	Esta es una técnica laboriosa que requiere de personal y equipo especializado. Su éxito de transformación es limitado debido a las características y espesor de las paredes celulares vegetales. En ella se inmoviliza el material vegetal a transformar y se absorbe el ADN en una microaguja generada con un microcapilar. Mediante el uso de un microscopio equipado con un microdisector, se acerca la microaguja al tejido, se inyecta y aplica presión dentro del capilar, permitiendo la salida del líquido a la célula. Es importante calibrar la salida de líquido para no causar que la célula se dañe por la presión ejercida. Posteriormente se retira la micro aguja y se incuban las células, esperando que su viabilidad no se haya comprometido con el procedimiento.

***Fuente:*** Gutiérrez, et al, 2015- *Estado actual de los cultivos genéticamente modificados en México y su contexto internacional*

## 6.15 Ventajas Y Desventajas De La Fitorremediación

*Tabla 5- Ventajas Y Desventajas De La Fitorremediación*

<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
Se puede realizar in situ y ex situ.	En especies como los árboles o arbustos, la fitorremediación es un proceso relativamente lento
Se realiza sin necesidad de trasportar el sustrato contaminado, con lo que se disminuye la diseminación de contaminantes a través del aire o del agua.	Se restringe a sitios de contaminación superficial dentro de la rizosfera de la planta.
Es una tecnología sustentable.	El crecimiento de las plantas está limitado por concentraciones toxicas de contaminantes, por lo tanto, es aplicable a ambientes con concentraciones bajas de contaminantes
Es eficiente tanto para contaminantes orgánicos como inorgánicos	En el caso de la fitovolatilización, los contaminantes acumulados en las hojas pueden ser liberados nuevamente al ambiente
Es de bajo costo.	Los contaminantes acumulados en maderas pueden liberarse por procesos de combustión
No requiere personal especializado para su manejo	No todas las plantas son tolerantes o acumuladoras.

No requiere consumo de energía	La solubilidad de algunos contaminantes puede incrementarse, resultando en un mayor daño ambiental o migración de contaminantes.
Sólo requiere de prácticas agronómicas convencionales.	Se requieren áreas relativamente grandes
Es poco perjudicial para el ambiente	En sistemas acuáticos se puede favorecer la diseminación de plagas, tales como los mosquitos.
Actúa positivamente sobre el suelo, mejorando sus propiedades físicas y químicas, debido a la formación de una cubierta vegetal	
Tiene una alta probabilidad de ser aceptada por el público, ya que es estéticamente agradable	
Evita la excavación y el tráfico pesado.	
Se puede emplear en agua, suelo, aire y sedimentos	
Permite el reciclado de recursos (agua, biomasa, metales).	

*Fuente: Delgadillo et al. 2011 - Fitorremediación: Una alternativa para eliminar la contaminación, Tropical & Subtropical*

### **6.16 Plantas Exitosas Que Permiten Metabolizar Mercurio**

De acuerdo con Paisio *et al.* “Los primeros trabajos que generaron plantas transgénicas con la finalidad de aumentar la tolerancia a Hg surgieron a principios de los 90, cuando Meagher

*y sus colaboradores utilizaron los genes mer A y B, correspondientes al operón mer, previamente citado, para transformar plantas. Los genes bacterianos fueron modificados para lograr su expresión adecuada en plantas de Arabidopsis (Rugh et al., 1996). A partir de este trabajo, diferentes especies vegetales, tales como tabaco (Heaton et al., 2005), álamo (Rugh et al., 1998), algodón (Che et al., 2003) y arroz (Heaton et al., 2003) fueron transformadas con el gen mer A, cuya expresión constitutiva les permitió tolerar al menos concentraciones 10 veces mayores de Hg(II) que las plantas controles y fueron capaces de fitovolatilizar Hg(0). Entre estas plantas se destacaron el álamo y el algodón, ya que por poseer raíces más profundas serían adecuadas candidatas para la remediación de Hg.*

*como es el caso de A. thaliana (Bizily et al., 1999). En esta planta transgénica se demostró que la sola expresión del gen mer B confería tolerancia a MeHg, sin embargo el Hg(II) se acumuló en las mismas. Esto llevó a proponer la co-expresión de ambos genes (mer A y mer B), obteniéndose plantas que fueron 50 veces más tolerantes a MeHg que las plantas control y 5 veces más tolerantes que aquellas que sólo expresaban el gen mer B (Bizily et al., 2000)”.*

## **7 RESTAURACIÓN ECOLÓGICA**

Según Vargas, *et al* 2012. Un ecosistema es un área de cualquier tamaño, con una estrecha relación o asociación de sus componentes físicos (abióticos) y biológicos (bióticos) y organizado de tal manera que, si cambia un componente, o subsistema, cambian los otros componentes y en consecuencia el funcionamiento de todo el ecosistema.

Cuando los ecosistemas están muy degradados o destruidos, han perdido sus mecanismos de regeneración y, en consecuencia, es necesario ayudarles o asistirlos en su recuperación, a estas acciones se las denomina restauración activa o asistida (sucesión dirigida o asistida). Ésta implica,

que, con ayuda humana, se asista o ayude al ecosistema para garantizar el desarrollo de los procesos de recuperación y superar los tensionantes que impiden la regeneración.

La capacidad de restaurar exitosamente un ecosistema dependerá de gran cantidad de factores como son:

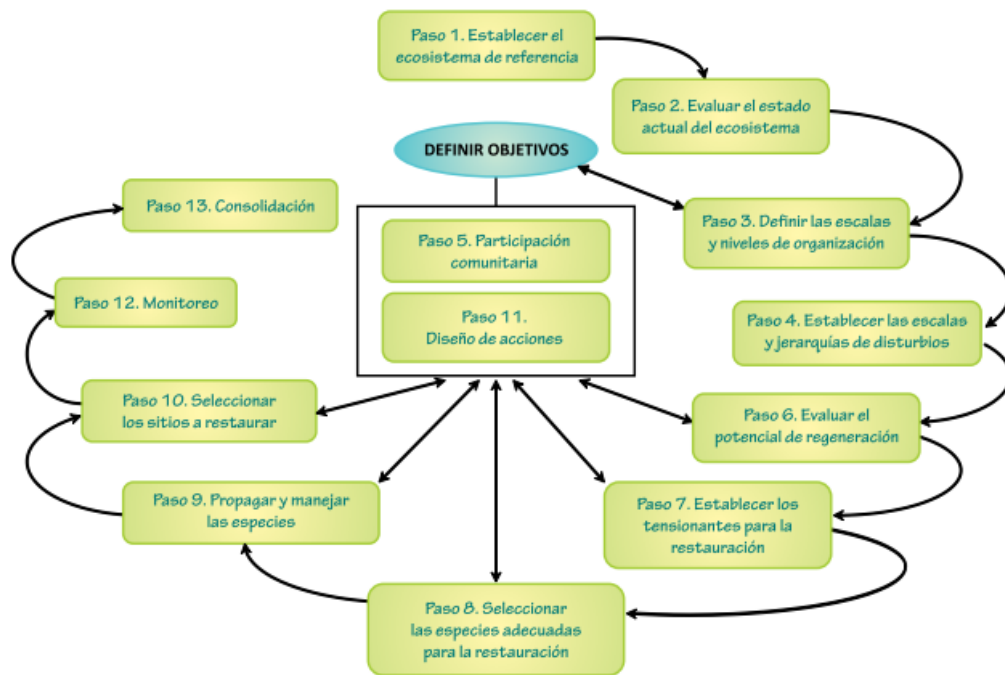
- Estado del ecosistema antes y después del disturbio
- Grado de alteración de la hidrología, la geomorfología y los suelos
- Causas por las cuales se generó el daño; la información acerca de las condiciones ambientales regionales
- Interrelación de factores de carácter ecológico, cultural e histórico
- Disponibilidad de la biota nativa necesaria para la restauración
- Trayectorias sucesiones de la vegetación y su composición de especies y el papel de la fauna en los procesos de regeneración
- El éxito en la restauración también dependerá de los costos, las fuentes de financiamiento, la voluntad política de las instituciones interesadas en la restauración
- Colaboración y participación de las comunidades locales en los proyectos.

### **7.1 Pasos Fundamentales En La Restauración Ecológica**

Al escoger un área para restaurar se puede presentar una gran variedad de factores, tanto naturales como sociales, de los que dependerán las acciones a realizar, las cuales serán diferentes para cada sitio dentro de un mismo ecosistema,

Aunque no existe un proceso exacto para restaurar un ecosistema por la particularidad intrínseca de cada sitio, sí existen recomendaciones generales basadas en las teorías y conceptos de la Ecología de la Restauración y en las experiencias acumuladas en los intentos de restaurar diferentes ecosistemas en el mundo.

De acuerdo con Vargas, *et al 2012* se presentan 13 pasos para tener en cuenta en un proyecto de restauración ecológica.



**Imagen 11- Pasos Para Tener En Cuenta En Un Proyecto De Restauración Ecológica**

Fuente: (Vargas et al 2007 Vargas O, Diaz J, Reyes S, Gómez P (2012) *Guías Técnicas Para La Restauración Ecológica De Los Ecosistemas De Colombia*, Departamento de Biología Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia, Última consulta: 06 de agosto 2018, Disponible en:

[http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/plan\\_nacional\\_restauracion/Anexo\\_8\\_Guias\\_Tecnicas\\_Restauracion\\_Ecologica\\_2.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/plan_nacional_restauracion/Anexo_8_Guias_Tecnicas_Restauracion_Ecologica_2.pdf)

### **7.1.1 Paso 1- Definir El Ecosistema De Referencia**

Sirve de modelo para planear un proyecto de restauración y más adelante, para su evaluación. No siempre es fácil identificar este referente, pero la reconstrucción con base en la información de diferentes fuentes puede dar mayor certeza de las condiciones anteriores a los disturbios.

A continuación, se presenta seis recomendaciones para establecer el ecosistema de referencia.

- ✓ Revisión de descripciones ecológicas y listas de especies antes de la perturbación.
- ✓ Revisión de fotografías históricas y recientes, tanto aéreas como terrestres y mapas del sitio del proyecto antes del daño.
- ✓ Ubicación de remanentes del sitio que se va a restaurar que indiquen las condiciones físicas anteriores y la biota. En los paisajes aún quedan relictos o parches de la vegetación original, que pueden indicar trayectorias sucesionales posibles del ecosistema original y que tienen una muestra importante de las especies sucesionales tempranas y tardías del ecosistema original.
- ✓ Revisión de descripciones ecológicas y listas de especies de ecosistemas similares e intactos. Con base en la información de especímenes de herbario y museos. Los herbarios de Colombia.

- ✓ Revisión de versiones históricas e historias orales de personas familiarizadas con el sitio del proyecto antes del daño.
- ✓ Evidencias paleoecológicas y paleohidrológicas. En Colombia gracias a los trabajos del Dr. Thomas van de Hammen y colaboradores, se tiene una muy buena bibliografía de la historia de clima y vegetación de casi todos los grandes biomas. . (Vargas et al. 2007).

### **7.1.2 Paso 2- Evaluar El Estado Actual Del Ecosistema**

Se debe hacer una evaluación de las condiciones previas y actuales del ecosistema. En esta fase se empieza a tener evidencia del problema para poder precisar posteriormente los objetivos de restauración.

- ✓ Condiciones Del Paisaje

#### **Ubicación de parches del ecosistema original**

- a) Número de parches, tamaño, forma, conectividad. En el caso de los ecosistemas acuáticos, es importante tener una visión de la cuenca en aspectos como la geomorfología, con el fin de definir el estado de la hidrodinámica; también es importante definir los componentes determinantes del flujo de agua, así como sus entradas y salidas, para determinar el estado hidráulico del ecosistema y su conectividad.
- b) Tipos de usos de suelo donde se encuentran los relictos (potreros, cultivos, plantaciones). Usos de la tierra en un ciclo anual y su relación con las áreas a restaurar

## **Condiciones Bióticas**

- a) Tipos de comunidades: Composición de especies, dinámica de la vegetación (tipos de sucesiones ecológicas: herbáceas, epífitas, arbustivas, arbóreas, estratificación).
- b) Ubicación de poblaciones de especies sucesionales tempranas y tardías
- c) Fauna dispersora de semillas
- d) Biota en el suelo

## **Condiciones Abióticas**

- a) Estado del suelo y el agua: Valoración fisicoquímica, contaminación, erosión, niveles freáticos
- b) Topografía, hidrodinámica, hidrología y geomorfología:
- c) Clima regional: distribución de las precipitaciones, duración de la estación seca, fluctuaciones diarias de las temperaturas, frecuencia de heladas. . (Vargas et al. 2007).

### ***7.1.3 Paso 3- Definir Las Escalas Y Niveles De Organización***

De acuerdo con Vargas, *et al* 2012 los proyectos de restauración ecológica abarcan diferentes niveles de organización, desde poblaciones de especies y comunidades hasta ecosistemas o paisajes (Ehrenfeld 2000, Lake 2001). En cada nivel se definen objetivos de trabajo diferentes y consecuentemente los procesos críticos que se deben tener en cuenta para la restauración, cambian según la escala y el nivel de análisis. Para definir los objetivos de un proyecto de restauración es necesario primero precisar escalas y su relación con los niveles de organización.

- ✓ **Escala de Paisaje:** Implica la búsqueda de la reintegración de ecosistemas fragmentados y paisajes, más que el enfoque sobre un único ecosistema. De hecho, aún si el objetivo de la restauración es planteado a escala ecosistémica, se requiere una visión del proceso a una escala de paisaje, puesto que las funciones ecosistémicas están relacionadas con flujos de organismos, materia y energía entre las diferentes unidades del paisaje.
- ✓ **Escala Regional o Nivel ecosistémico:** En la actualidad, la escala a la cual se recomienda establecer los objetivos para la restauración es la escala regional a nivel de ecosistema, en este caso el objetivo de la restauración es principalmente la recuperación de algunas funciones del ecosistema. Esta visión implica que lo que se debe retornar a su estado predisturbio, son las condiciones ecológicas que garantizan la recuperación de la composición, estructura y función del ecosistema, integrando los procesos a gran escala con los de pequeña escala.
- ✓ **Escala local y Nivel de comunidad:** La restauración a nivel de comunidades hace énfasis en el restablecimiento de la comunidad original, especialmente con fines de preservación de comunidades raras o en peligro de extinción, o la restauración de trayectorias sucesiones de especies pioneras.
- ✓ **Escala local y Nivel de especie:** pretende la recuperación de poblaciones de una especie en particular, tratando principalmente de recrear el hábitat de dicha especie. La ventaja de esta aproximación es que posee un objetivo muy claro, que es el rescate mismo de la especie.

**Definición de objetivos:** En este punto se puede definir los objetivos se deben establecer con mucha claridad para lograr que el proyecto tenga éxito en términos de efectividad y costos. Para lo cual es indispensable definir con la mayor precisión posible el tipo de influencias externas. Un aspecto importante para la definición de los objetivos se relaciona con el presupuesto destinado

para el desarrollo del proyecto de restauración, ya que de estos recursos depende la extensión del área a intervenir, el personal contratado para las diversas funciones, la cantidad de acciones que puedan ser implementadas y el tiempo que dure la implementación, evaluación y monitoreo.

#### **7.1.4 Paso 4- Establecer Las Escalas Y Jerarquías De Disturbio**

Según. Vargas *et al.* 2007 todos los ecosistemas están sujetos a un régimen de disturbios naturales y antrópicos, la combinación de éstos establece una dinámica espacial y temporal en los paisajes.

- ✓ **Dimensión espacial y magnitud:** La escala espacial se refiere a la extensión del disturbio, en términos de las dimensiones físicas de la zona afectada, expresadas en unidades de área o de volumen. La magnitud por su parte, se relaciona con la fuerza, intensidad o severidad del disturbio (GleenLewin & van der Maarel 1992).
- ✓ **Dimensión temporal:** Incluye frecuencia y predictibilidad del disturbio, Según la frecuencia, los disturbios pueden clasificarse como raros, si ocurren en un tiempo menor al lapso de vida de las especies más longevas; o frecuentes, si ocurren muchas veces dentro del lapso de vida de las especies menos longevas.

#### **7.1.5 Paso 5- Consolidar La Participación Comunitaria**

La pérdida de los servicios ambientales de los ecosistemas es una preocupación de las personas en cualquier región y por consiguiente hay que tener en cuenta tanto el manejo regional como las necesidades de las comunidades locales. Por eso es muy importante que la gente participe activamente, desde su formulación en los proyectos de restauración, lo cual puede garantizar su continuidad y consolidación

Es muy importante explorar la aceptabilidad que tendría el eventual programa de restauración, en función del entorno socioeconómico que prevalezca en el área, con especial atención a las aspiraciones propias de las comunidades humanas locales, en términos del futuro que desean.

Es necesaria la búsqueda de actividades económicas alternativas, como el desarrollo de especies vegetales promisorias o la zootecnia, viveros comunitarios con el fin de incentivar el aprovechamiento de recursos naturales propios de la región que contribuyan a valorar la biodiversidad existente y a garantizar a largo plazo la continuidad del proyecto. (Vargas et al. 2007).

#### ***7.1.6 Paso 6- Evaluar El Potencial De Regeneración***

Es el conjunto de especies nativas y trayectorias sucesionales que ofrece un paisaje. En esta fase se tiene una aproximación a las especies pioneras y a las especies de sucesión tardía, a las especies dominantes, codominantes y raras y sobre todo a las especies que potencialmente pueden ser utilizadas en experimentos y programas de restauración.

Algunas de las trayectorias sucesionales pueden servir como ecosistema o comunidad de referencia y es importante conocer muy bien su composición de especies, estratificación y los mecanismos de regeneración de las especies: bancos de semillas, bancos de plántulas, bancos de retoños y los mecanismos de dispersión en el paisaje. . (Vargas et al. 2007).

#### ***7.1.7 Paso 7- Establecer Los Tensionantes Para La Restauración A Diferentes Escalas***

Los tensionantes son aquellos factores que impiden, limitan o desvían la sucesión natural en áreas alteradas por disturbios naturales y antrópicos (Vargas et al. 2007).

### 7.1.7.1 Tensionantes Ecológicos:

- ✓ Tensionantes relacionados con la dispersión de las plantas: Son causados generalmente por la fragmentación y pérdida de hábitats y la extensión de matrices de potreros, cultivos y especies exóticas. Estos tensionantes hacen referencia al destino de los propágulos
- ✓ Tensionantes relacionados con el establecimiento de las plantas: La fase de establecimiento comprende la germinación de las semillas y el crecimiento y sobrevivencia de las plántulas. Pueden clasificarse en dos grandes grupos relacionados con factores abióticos y bióticos.

**Tabla 6- Tensionantes Relacionados Con El Establecimiento De Las Plantas**

<b>Factores Abióticos</b>	<b>Factores Bióticos</b>
Ausencia de micrositios para el establecimiento de las plántulas	Ausencia de micorrizas
Restricciones climáticas	Hojarasca gruesa que impide el establecimiento
Suelo inadecuado	Herbívora
	Competencia
	Presencia de especies invasoras

*Fuente: Vargas et al*

**Tensionantes relacionados con la persistencia de las plantas:** La fase de persistencia hace referencia a que una especie una vez establecida pueda crecer y cumplir su ciclo normalmente, sin ser disminuida su biomasa o que algún factor le cause mortalidad.

**Tabla 7-Tensionantes Relacionados Con La Persistencia De Las Plantas**

<b>Factores Abióticos</b>	<b>Factores Bióticos</b>	<b>Factores Sociales</b>
Restricciones climáticas	Competencia	Pastoreo y agricultura
	Herbívora	Fuegos antrópicos
Fuegos Naturales	Plagas	introducción de especies invasoras
	Presencia de especies invasoras	Corte

*Fuente: Vargas et al*

### **7.1.8 Paso 8- Seleccionar Las Especies Adecuadas Para La Restauración**

La selección de especies para la restauración es un aspecto muy importante, puesto que el éxito de los proyectos depende de la capacidad para dicha selección. Del listado de especies y sus trayectorias sucesionales registrado en el potencial de regeneración, se seleccionan las especies más importantes bajo una escala de atributos o rasgos que pueden ser útiles en los sitios que se van a restaurar en este caso las plantas genéticamente modificadas con una alta tolerancia a Hg como son Arabidopsis, tabaco, álamo y mostaza. (Vargas et al. 2007).

### **7.1.9 Paso 9- Propagar Y Manejar Las Especies**

Una vez seleccionadas las especies se procede a realizar el cultivo de las plantas de manera in vitro modificándolas genéticamente para que sean tolerantes al Hg, simultáneamente se construyen viveros o invernaderos con el fin de tener material permanente pionero requerido para que inicien la sucesión de especies en estados más avanzados que permitan la recuperación de la estructura y la composición del ecosistema. . (Vargas et al. 2007).

### **7.1.10 Paso 10- Seleccionar Los Sitios**

Se debe seleccionar los sitios a restaurar, o donde se van a realizar experimentos, debe hacerse cuidadosamente para poder evidenciar como actúa el régimen de disturbios naturales y antrópicos. A continuación, se expone el conjunto de recomendaciones para la selección de los sitios prioritarios.

- ✓ Ubicación de los sitios accesibles: Se debe tener en cuenta que debe haber vías o caminos de acceso, o sitios cercanos en donde no sea difícil el transporte de los materiales necesarios.
- ✓ Facilidades para realizar la fase de monitoreo.
- ✓ Áreas de interés comunitario: Es importante que se discuta con la comunidad los sitios prioritarios para restaurar, lo ideal es que la comunidad participe en la selección de los sitios, por algún interés especial relacionado con servicios ambientales, como agua, detener la erosión, recursos de amplia utilización por las comunidades
- ✓ Evaluar con las comunidades locales las actividades humanas, buscando la mayor compatibilidad posible con el proyecto. Evaluar si algunas prácticas culturales son compatibles con el desarrollo de proyectos de restauración.
- ✓ Se debe evaluar si hay especies invasoras en el sitio o en los alrededores y evitar que se introduzcan estas especies tanto de plantas como de animales. Planear actividades continuas con la comunidad, para el manejo de especies invasoras.
- ✓ No es recomendable remover especies introducidas naturalizadas (no invasoras), que cumplen una importante función ecológica.
- ✓ Restablecer el régimen del flujo hidrobiológico natural.
- ✓ Evaluar el estado del suelo. (Vargas et al. 2007).

#### ***7.1.11 Paso 11- Diseño De Acciones Para La Restauración***

- ✓ Basadas en la remoción y control de los tensionantes leves (frecuencia de quemas, sobrepastoreo, tasa de cosecha, erosión moderada).
- ✓ Basadas en la adición de especies (plantas, animales o microorganismos) o materiales (fertilizantes, materia orgánica, agua).

- ✓ Basadas en la regulación de la tasa de procesos ecosistémicos, es decir, los flujos entre los compartimientos (ej: regular la composición y estructura del suelo para sincronizar liberación de nutrientes y captación vegetal de estos).
- ✓ Basadas en la remoción de los tensionantes severos.
- ✓ Basadas en la regulación de las fuentes de entradas de energía. (Vargas *et al.* 2007).

#### **7.1.12 Paso 12- Monitorear El Proceso De Restauración**

El monitoreo consiste en el seguimiento y evaluación continuos de los cambios que experimenta el ecosistema, bajo los diferentes tratamientos de restauración aplicados. Tiene como objetivo final asegurar el éxito en la restauración ecológica, brindando información necesaria para evaluar y ajustar las prácticas de restauración, de modo que puedan ser modificadas en cualquier momento; de esta manera, si los resultados obtenidos en los tratamientos aplicados son negativos o indeseables, dichos tratamientos se modifican o detienen; por el contrario, si se obtienen resultados positivos, estos tratamientos se continúan, multiplican, y si es posible, se mejoran. (Vargas *et al.* 2007).

En el diseño de un programa de monitoreo, es importante tener en cuenta los siguientes aspectos (Díaz 2007):

- ✓ Definir los objetivos del programa de monitoreo en el mismo momento en que se definen los objetivos de la restauración ecológica, y en concordancia con estos.
- ✓ Establecer las escalas espaciales y temporales (monitoreo a corto y largo plazo), en las cuales se desarrollarán la restauración ecológica y el programa de monitoreo.
- ✓ Seleccionar los parámetros que se han de monitorear y los indicadores ecológicos adecuados para evaluar su desempeño.

- ✓ Escoger la metodología adecuada para el monitoreo de los diferentes indicadores ecológicos. (Vargas et al. 2007).

### ***7.1.13 Paso 13- Consolidar El Proceso De Restauración***

La consolidación de un proyecto de restauración implica que se han superado todos los tensionantes del disturbio y que el ecosistema marcha de acuerdo a los objetivos planteados, las labores de mantenimiento y monitoreo deben indicar que el proceso marcha satisfactoriamente y el ecosistema empieza a mostrar variables de auto sostenimiento, como el enriquecimiento de especies, la recuperación de la fauna, el restablecimiento de servicios ambientales relacionados con la calidad del agua y el suelo. (Vargas et al. 2007).

## 9 CONCLUSIONES

- Para el proceso de fitorremediación se recomienda usar plantas hiperacumuladoras o metalófitas las cuales tienen la capacidad de presentar un rápido crecimiento, amplios rangos de adaptación climática y la capacidad de absorber grandes volúmenes de agua (en relación con otras especies), lo que les permite manejar grandes cantidades de contaminantes disueltos, así como limitar la cantidad de agua que escapa más allá de la zona contaminada y que limita la dispersión de la contaminación.
- Los métodos de transformación genética en especies vegetales modificadas con el operón Mer permite la metalorregulación y la reducción del mercurio permitiendo la reductasa mercúrica, el operón MerA, reduce el Hg (II), utilizando NADPH como reductor, por lo que debe estar contenido dentro de una célula metabólicamente activa que en este caso son las células vegetales.
- Los agentes quelantes de las plantas son una herramienta muy importante para los procesos de fitorremediación ya que los metales combinados con los quelantes pierden su carga y son incapaces de reaccionar con otras sustancias haciendo que el daño a la célula disminuya, estos agentes son positivos y permiten acelerar la absorción de metales por la raíz.
- Para implementar un tratamiento de fitorremediación se debe hacer un estudio minucioso del estado del suelo a restaurar con el fin de que especie vegetal seleccionada permita revertir la degradación.
- La fitorremediación es una técnica biotecnológica que permite realizar la restauración de los ecosistemas degradados con mercurio de manera asistida, toda vez que al restaurar la degradación de los ecosistemas aumenta la calidad del hábitat para la fauna, acrecentando la cobertura nativa y fortaleciendo la conectividad de los elementos del paisaje.

- Colombia es un país donde se puede implementar técnicas biotecnológicas como es la fitorremediación con plantas genéticamente modificadas ya que sus suelos son de vocación agrícola lo cual le permite optimizar el rendimiento de esta técnica.

## 10 BIBLIOGRAFIA

Akpor O, Muchie M. (2010). Remediation of heavy metals in drinking water and wastewater treatment systems: Processes and applications. *International Journal of the Physical Sciences*, 5(12):1807-1817, Recuperado el 15 de Julio de 2018, de: [https://www.researchgate.net/publication/277775724\\_Remediation\\_of\\_heavy\\_metals\\_in\\_drinking\\_water\\_and\\_wastewater\\_treatment\\_systems\\_Processes\\_and\\_applications](https://www.researchgate.net/publication/277775724_Remediation_of_heavy_metals_in_drinking_water_and_wastewater_treatment_systems_Processes_and_applications)

Artisanal Gold Council (2014) Mercury watch Mercury released from ASGM. [Internet]. Consultado junio 2018, Disponible en: <http://www.artisanalgold.org/?s=colombia>

Bhat, R.; Srinivasan, S. (2002). Molecular and genetic analyses of transgenic plants: Considerations and approaches. *Plant Sci.* (Holanda). 163:673-681. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168945202001528>

Beltrán M, Gómez A, (2016) Biorremediación de metales pesados Cadmio (Cd), Cromo (Cr) y mercurio (Hg) Mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: Una revisión, Universidad Militar Nueva Granada Recuperado el 25 de junio de 2018, Disponible en: <file:///C:/Users/hp/Documents/ARCHIVOS%20MONOGRAFIA/de%20t%C3%A9cnicas%20de%20fitorremediaci%C3%B3n%20viables%20para%20el%20tratamiento%20de%20suelos%20contaminados%20con%20mercurio,%20a%20partir%20de%20plantas%20gen%C3%A9ticamente>

[%20modificadas%20con%20el%20gen%20merA/informaci%C3%B3n%20gen%20MerA%20y%20fitorremediaci%C3%B3n.pdf](#)

Benítez Y (2017) Estado del arte en métodos biotecnológicos potenciales a ser empleados para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con mercurio, provenientes de la minería aurífera, Universidad Católica de Manizales, Recuperado el 25 de junio de 2018, Disponible en: <http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/handle/10839/1785/Yeison%20Javier%20Benitez%20Caicedo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Bernal González, M. (2012). Revista de Logística. Obtenido de <http://revistadelogistica.com/actualidad/mineria-de-oro-en-colombia-auge-y-problematica/>

Bravo M, Luna J, Quesada C, Segura M, Pérez J, (2016) Actividad minera y su impacto en la salud humana, Revista Ciencia UNEMI, Volumen 9 numero 17, pg 92-100, Ultima consulta: 02 de julio 2018, Disponible en: <file:///C:/Users/hp/Downloads/Dialnet-ActividadMineraYSuImpactoEnLaSaludHumana-5556797.pdf>

Clemens, S, Palmgren M & Kramer U ,(2002) A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation, Trends in Plant Science Vol.7 No.7 July 2002, Recuperado el 22 de Julio de 2018, de: [http://arquivo.ufv.br/DBV/PGFVG/BVE684/htms/pdfs\\_revisao/Molecularplantnutrition/understanding%20and%20engineering%20plant%20metal%20accumulation.pdf](http://arquivo.ufv.br/DBV/PGFVG/BVE684/htms/pdfs_revisao/Molecularplantnutrition/understanding%20and%20engineering%20plant%20metal%20accumulation.pdf)

Congreso de Colombia. (2001). Ley 685 por la cual se expide el Código Minero. Recuperado el 9 de junio de 2018 disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal>

Contraloría General de la república (2013) La explotación ilícita de los recursos minerales en Colombia Casos del Valle del Cauca, Choco efectos sociales y ambientales Consultado junio 2018, Disponible en: <https://www.contraloria.gov.co/documents/20181/198738/Separata-Mineria-Ilegal.pdf/4d3d5cbe-4bda-430a-831e-ef2f6bbf5d0d?version=1.0>

Cuadros D, (2010) Uso, efectos y recuperación del mercurio en la minería aluvial en Madre de Dios, Ministerio de Energía y Minas Dirección general de minería oficina desconcentrada Madre de Dios, Última consulta: 02 de julio 2018, Disponible en: <https://es.slideshare.net/DavidCuadrosTorres/10-uso-y-recuperacion-del-mercurio-en-mineria-mdd-julio-2010>

Cherian, S., Oliveira, M. (2005). Transgenic plants in phytoremediation: recent advances and new possibilities. *Environmental Science & Technology*. 39: 9377-9390. Última consulta: 14 de julio 2018, Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_nlinks&ref=7755589&pid=S1870-0462201100020000200023&lng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=7755589&pid=S1870-0462201100020000200023&lng=es)

Danilova, S. (2007). The technologies for genetic transformation of Cereals. *Russian J. Plant Physiol.* 54(5):569-581. Recuperado en 22 de julio de 2018 Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1021443707050019>

Defensoría del pueblo (2010) Minería de hecho en Colombia, Recuperado el 9 de junio de 2018, Disponible en [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4\\_uibd.nsf/F11B784C597AC0F005257A310058CA31/\\$FILE/La-miner%C3%ADa-de-hecho-en-Colombia.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/F11B784C597AC0F005257A310058CA31/$FILE/La-miner%C3%ADa-de-hecho-en-Colombia.pdf)

Defensoría del Pueblo (2015) La minería sin control, un enfoque desde la vulneración de los derechos humanos Recuperado el 9 de junio de 2018, Disponible en: <http://www.defensoria.gov.co/public/pdf/InformedeMinerIa2016.pdf>

Delgadillo A, González C, Prieto F, Villagómez J & Acedo O, (2011) Fitorremediación una alternativa para eliminar la contaminación, *Tropical & Subtropical Agroecosystems*, No. 14 pg - 597-612, , Recuperado en 29 de julio de 2018 Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n2/v14n2a2.pdf>

Diaz C, Chaparro A (2012) Métodos de transformación genética de plantas, Revista UDCA actualidad y divulgación científica, Volumen 15 No. 1, Recuperado en 22 de julio de 2018, de: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-42262012000100007](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262012000100007)

Dietz, A., Schnoor, J. (2001). Advances in phytoremediation. *Environmental Health Perspectives*. 109:163-168 Recuperado en 15 de julio de 2018, de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1240550/>

Doadrio A (s,f) Eco toxicología y acción toxicológica del mercurio, Académico de número de la real academia nacional de farmacia, Ultima consulta: 06 de julio 2018, Disponible en: <http://www.ingenieroambiental.com/4014/mercurio545.pdf>

Eapen, S. (2008). Advances in development of transgenic pulse crops. *Biotechn. Adv.* (Holanda). 26:162168. Recuperado en 22 de julio de 2018 Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S073497500700119X>

Español S, (2001) Toxicología del mercurio, actuaciones preventivas en sanidad laboral y ambiental, Minas de Almaden y Arrayanes S.A, Ultima consulta: 02 de julio 2018, Disponible en: <http://www.gama-peru.org/jornada-hg/espanol.pdf>

Filipecki, M.; Malepszy, S. (2006). Unintended consequences of plant transformation: a molecular insight. J. Appl. Genet. (Polonia) 47(4):277-286. Recuperado en 22 de julio de 2018 Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03194637>

Goñi E, Sabogal A, Asmat R (2014) Minería informal acuífera en Colombia, Fedesarrollo, Recuperado el 9 de junio de 2018 disponible en: <http://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/368/Mineria%20informal%20a%20urifera%20en%20Colombia%20-%20Informe%20linea%20base%20mineria%20informal%20-%20pagina%20Fedesarrollo.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Gutiérrez M, (s,f) Mercurio, Universidad Autónoma metropolitana- Iztapalapa México, Última consulta: 02 de julio 2018, Disponible en: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-03a12.pdf>

Gutiérrez D, Ruiz R, Xoconostle B, (2015) Estado actual de los cultivos genéticamente modificados en México y su contexto internacional, Departamento de Biotecnología y Bioingeniería, Centro de investigación y de estudios avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Recuperado en 29 de julio de 2018 Disponible en: <https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/comunicacion/publicaciones/Estado-actual-de-los-cultivos.pdf>

Hernández, A. R. (2012). Ilegalidad minera, problema social y de criminalidad. UN Periódico, Unidad de Medios de Comunicación, págs. 1 - 2.

Hernández M, González J. & López D. (2004). Plant based biorremediation and mechanism of heavy metal tolerance of plants. Proc. Indian natan Sci Acad, 70 (1):1-12. Recuperado en 22 de julio de 2018, de:

<https://www.researchgate.net/publication/230583638> Plant based bioremediation and mechanisms of heavy metal tolerance of plants a review

Hinton J, Veiga M (2001) Mercury Contaminated Sites: A Review of Remedial Solutions, s. In: Proceedings of the National Institute of Minamata Disease forum, Minamata city, Japan: 73-84, Última consulta: 14 de Julio 2018, Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.486.2387&rep=rep1&type=pdf>.

Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander Von Humboldt Colombia (2014) ¿Restauración ecológica? , Recuperado en 1 de agosto de 2018 Disponible en: <http://www.humboldt.org.co/es/actualidad/item/635-restauracion-eco>

Instituto de investigaciones de la Amazonia Peruana y Ministerio de Ambiente (2011) Minería Aurífera en Madre de Dios y contaminación con mercurio, Una bomba de tiempo. Última consulta: 14 de julio 2018, Disponible en: [file:///C:/Users/hp/Downloads/2186%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/hp/Downloads/2186%20(1).pdf)

Jiménez A (2005) Interacción del mercurio con los componentes de las aguas residuales, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ingeniería y arquitectura, Última consulta: 06 de julio 2018, Disponible en: <file:///C:/Users/hp/Documents/ARCHIVOS%20MONOGRAFIA/caracter%C3%ADsticas%20f%C3%ADsticas%20y%20qu%C3%ADmicas%20del%20mercurio/angelicamariajimenezgomez.2005.pdf>

KarimI, M.; Bleys, A.; Vanderhaeghen, R.; WILSON, P. (2007). Building blocks for plant gene assembly. Plant Physiol. (Estados Unidos). 145:1183- 1191. Recuperado en 22 de julio de 2018, Disponible en: <http://www.plantphysiol.org/content/145/4/1183.short>

Karami, O.; Esna-ashari, M.; Karimi, G.; Aghavaishi, B. (2009). *Agrobacterium*-mediated genetic transformation of plants: the role of host. *Biol. Plant. (República Checa)*. 53(2):201-212. . Recuperado en 22 de julio de 2018 Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10535-009-0041-z>

Komives, T., Gullner, G. (2005). Phase I xenobiotic metabolic systems in plants. *Naturforsch.* 60:179-185. Recuperado en 15 de julio de 2018, de: [https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/37825820/Komives\\_Phase\\_I\\_ZNF\\_2005.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1532126308&Signature=a%2FZKys5%2FqfDxepUBTswcHO%2FWOGQ%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DPhase\\_I\\_xenobiotic\\_metabolic\\_systems\\_in.pdf](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/37825820/Komives_Phase_I_ZNF_2005.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1532126308&Signature=a%2FZKys5%2FqfDxepUBTswcHO%2FWOGQ%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DPhase_I_xenobiotic_metabolic_systems_in.pdf)

Kelley, C, Baca-Spry A., Cruickshank, B. (2000). Incorporation of phytoremediation strategies into the introductory chemistry laboratory. *Chem Educator*. 5:140-143. Ultima consulta: 14 de julio 2018, Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00897000383a>

Lenntech (2018) mercurio, Ultima consulta: 02 de julio 2018, Disponible en: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/hg.htm>

León D, Peñuela G, (2011) Trascendencia del metilmercurio en el ambiente, la alimentación y la salud Humana, Ultima consulta: 14 de julio 2018, Disponible en: <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/135/69>

Lillo J (S,F) Impactos de la minería en el medio natural, Grupo de geología Universidad Rey Juan Carlos, Recuperado el 17 de junio de 2018 disponible en: <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Impactos%20de%20la%20miner%C3%ADa%20-%20Javier%20Lillo.pdf>

Mancilla L (2016) ¿Qué es y cómo funciona un vector genético? Recuperado en 22 de julio de 2018 Disponible en: <https://vectoresbacterianos.wordpress.com/2016/11/27/que-es-y-como-funciona-un-vector-genetico/>

Mamani G, (2013) Nivel de conocimiento sobre medidas preventivas y efectos tóxicos del mercurio en trabajadores de la mina la rinconada puno -2012 , Universidad Nacional del Altiplano pg 13-14, Última consulta: 02 de julio 2018, Disponible en: [http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/2169/Mamani\\_Pari\\_Gleny.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/2169/Mamani_Pari_Gleny.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Ministerio de Minas y Energía (2015) Glosario técnico minero, Recuperado el 9 de junio de 2018, disponible en: <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/698204/GLOSARIO+MINERO+FINAL+29-05-2015.pdf/cb7c030a-5ddd-4fa9-9ec3-6de512822e96>

Ministerio de Minas y Energía. (2012). ABC Minero. Recuperado el 9 de junio de 2018 disponible en: <http://tibanaboyaca.gov.co/apc-aa-files/>

Ministerio de Minas y Energía (2011). Censo Minero Departamental Colombiano, p. 17. Recuperado de: <http://www.minminas.gov.co/>

Ministerio de Minas y Energía. Métodos de Explotación Minera. Vetas y Aluvión. Recuperado de: <http://www.simco.gov.co/>

Miretzky, P., Saralegui, A., Fernández-Cirelli, A. (2004). Aquatic macrophytes potential for the simultaneous removal of heavy metals (Buenos Aires, Argentina). Chemosphere. 57: 997-1005. Última consulta: 14 de julio 2018, Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653504006113>

Montserrat E, Bodas A, Rubio M, Martell R, Trasobares E, Ordoñez J, Guillem J, Herraiz M, García J, Rovira J, Calvo E, Román J, Llorente M, Sainz M, Martínez J, Breton L, Cuadrado M, Prieto S, Gallardo S, Moreno R, Bermejo P, Torres M, Arroyo M & Calle A, (2014) Efectos sobre la salud del metilmercurio en niños y adultos; estudios nacionales e internacionales, Revista Nutrición Hospitalaria Volumen 30(5):pg., 989-1007; Última consulta: 02 de julio 2018, Disponible en: <http://www.nutricionhospitalaria.com/pdf/7728.pdf>

Navarro- J. , Aguilar L, López J. ( 2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. Ecosistemas. 16: 10-25. Recuperado en 15 de julio de 2018, de: <https://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/125>

Pacchioni E, Sabogal A, Asmar R ( 2014) Minería informal aurífera en Colombia, Fedesarrollo , Recuperado en 19 de julio de 2018, de: <http://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/368/Mineria%20informal%20aurifera%20en%20Colombia%20-%20Informe%20linea%20base%20mineria%20informal%20-%20pagina%20Fedesarrollo.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Paisio, C, González P., Talano, M. & Agostini, E. (2012) Remediación biológica de Mercurio: Recientes avances. Rev Latinoam Biotecnol Amb Algal 3(2):119-146, Última consulta: 14 de julio 2018, Disponible en: [file:///C:/Users/hp/Downloads/38-1-148-1-10-20170425%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/hp/Downloads/38-1-148-1-10-20170425%20(2).pdf)

Pantoja F, Pantoja S, (2016) Problemas y desafíos de la minería del oro artesanal y a pequeña escala en Colombia, revista facultad de ciencias económicas., Vol. XXIV pg. 147-160 Última consulta: 20 de agosto de 2018, Disponible en: <file:///C:/Users/hp/Documents/ARCHIVOS%20MONOGRAFIA/IMPLICACIONES%20AMBIE>

[NTALES%20Y%20SOCIALES%20DE%20LA%20MINER%C3%8DA%20ILEGAL%20EN%20COLOMBIA/PROBLEMAS%20Y%20DESAF%C3%8DOS%20DE%20LA%20MINER%C3%8DA%20DE%20ORO.pdf](#)

Paz-Ferreiro J, Lu H, Fu S, Méndez A, Gascó G. (2014). Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: a review. *Solid Earth*, 5:65-75. Recuperado en 15 de julio de 2018, de: <https://www.solid-earth.net/5/65/2014/se-5-65-2014.html>

Porque Biotecnología (2007) Transformación genética de las plantas, Cuaderno 18, Recuperado en 22 de julio de 2018 Disponible en: <http://www.porquebiotecnologia.com.ar/index.php?action=cuaderno&opt=5&tipo=1&note=18>

Porque Biotecnología (2007) Tipos de fitorremediación donde se indica la zona de la planta donde ocurre el proceso , Cuaderno 10, Recuperado en 22 de julio de 2018 Disponible en: <http://www.porquebiotecnologia.com.ar/index.php?action=cuaderno&opt=5&tipo=1&note=18>

Procuraduría General de la Nación (s,f) Minería Ilegal en Colombia, Recuperado el 2 de agosto de 2018, Disponible en: <https://www.procuraduria.gov.co/portal/media/file/MINERIA%20ILEGAL%20EN%20COLOMBIA%20%20DOCUMENTO.pdf>

PNUMA - MADS. (2012). Sinopsis nacional de la minería aurífera artesanal y de pequeña escala. Bogotá: PNUMA - MADS Recuperado el 2 de agosto de 2018, Disponible en: [http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/mercurio/Sinopsis\\_Nacional\\_de\\_la\\_ASGM.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/mercurio/Sinopsis_Nacional_de_la_ASGM.pdf)

PNUMA. (2008). El uso del mercurio en la minería del oro artesanal y en pequeña escala, Recuperado el 2 de agosto de 2018, Disponible en: [https://ige.org/archivos/IGE/mercurio en la Minería de Au.pdf](https://ige.org/archivos/IGE/mercurio%20en%20la%20Mineria%20de%20Au.pdf)

Rascio N (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Sci.* 180:169–181. Recuperado el 15 de julio de 2018, de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168945210002402>

Reichenauer , T. Germida, J. (2008). Phytoremediation of organic contaminants in soil and groundwater. *ChemSusChem.* 1: 708-717. Recuperado en 15 de julio de 2018, de: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cssc.200800125>

Roy, S., Labelle, S., Mehta, P., Mihoc, A., Fortín, N, Masson, C, Leblan, R., Cha, G., Sura, C, Gallipeau, C, Olsen, C, Delisle, S., Labrecque, M., Greer, C. W. (2005). Phytoremediation of heavy metal and PAH-contaminated brownfield sites. *Plant and Soil.* 272: 277-290. Recuperado en 15 de julio de 2018, de: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11104-004-5295-9>

Sánchez J, Vanegas P (2015) Oro ilegal alternativa criminal, Universidad Militar Nueva Granada, Última consulta: 06 de julio 2018, Disponible en: [file:///C:/Users/hp/Documents/ARCHIVOS%20MONOGRAFIA/IMPLICACIONES%20AMBIENTALES%20Y%20SOCIALES%20DE%20LA%20MINER%C3%8DA%20ILEGAL%20EN%20COLOMBIA/Oro%20Ilegal,%20Alternativa%20Criminal%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/hp/Documents/ARCHIVOS%20MONOGRAFIA/IMPLICACIONES%20AMBIENTALES%20Y%20SOCIALES%20DE%20LA%20MINER%C3%8DA%20ILEGAL%20EN%20COLOMBIA/Oro%20Ilegal,%20Alternativa%20Criminal%20(1).pdf)

UNODOC (2016) Explotación de oro de aluvión, evidencias a partir de precepción remota, Recuperado el 25 de junio de 2018, Disponible en: [https://www.unodc.org/documents/colombia/2016/junio/Explotacion de Oro de Aluvion.pdf](https://www.unodc.org/documents/colombia/2016/junio/Explotacion%20de%20Oro%20de%20Aluvion.pdf)

Unidad Investigativa El Tiempo (2010). Con el Oro Lavan Dinero y se Roban Regalías, Reveló el Ex Jefe 'Para' Salvatore Mancuso. El Tiempo. Recuperado de: <http://www.eltiempo.com>

Universidad Autónoma de México (s,f) Hoja de seguridad del mercurio, Ultima consulta: 06 de julio 2018, Disponible en: <https://quimica.unam.mx/wp-content/uploads/2016/12/21HG.pdf>

Universidad de Granada (s,f) Química inorgánica ambiental, Tema 3, Metales pesados tóxicos: El mercurio, Ultima consulta: 06 de julio 2018, Disponible en: [http://www.ugr.es/~mota/QIA\\_TEMA-3\\_Hg.pdf](http://www.ugr.es/~mota/QIA_TEMA-3_Hg.pdf)

Valderrama E (2013) Implicaciones ambientales, sociales y jurídicas de la explotación minera en Colombia, Revista pluriverso No. 1 Ultima consulta: 06 de agosto 2018, Disponible en: <file:///C:/Users/hp/Documents/ARCHIVOS%20MONOGRAFIA/IMPLICACIONES%20AMBIENTALES%20Y%20SOCIALES%20DE%20LA%20MINER%C3%8DA%20ILEGAL%20EN%20COLOMBIA/MPLICACIONES%20AMBIENTALES%20SOCIALES%20Y%20JURIDICAS.pdf>

Vardanyan, L., Ingole, B. (2006) Studies on heavy metal accumulation in aquatic macrophytes from Sevan (Armenia) and Carambolim (India) lake systems. Environment International. 32: 208-218. Recuperado en 15 de julio de 2018, de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412005001856>

Vargas O, Diaz J, Reyes S, Gómez P (2012) Guías Técnicas Para La Restauración Ecológica De Los Ecosistemas De Colombia, Departamento de Biología Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia, Ultima consulta: 06 de agosto 2018, Disponible en: [http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/plan\\_nacional\\_restauracion/Anexo\\_8\\_Guias\\_Tecnicas\\_Restauracion\\_Ecologica\\_2.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/plan_nacional_restauracion/Anexo_8_Guias_Tecnicas_Restauracion_Ecologica_2.pdf)

