



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS FINALES PARA UN
PAQUETE DE FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS
CONTAMINADOS POR MERCURIO

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICA

QUE PRESENTA:

YANINE JAHZEL MARTÍNEZ GARCÍA

DIRECTOR DE TESIS

DR. MANUEL JIMÉNEZ ESTRADA



MÉXICO D.F

NOVIEMBRE 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Todo se lo debo a Dios por haberme puesto los medios para terminar a lo que llamaba infinito e imposible proceso. Porque si tienes amor está Dios y si está Dios no falta nada.

El amor incondicional de mi familia es lo más importante que puedo palpar, porque fue la valiosa ayuda para poder llevar al final esta difícil aventura.

Es por eso que agradezco a papá y a mamá por todos los regaños y motivaciones que me dieron, sin ellos no hubiera llegado hasta aquí, ni siquiera imagino mi vida sin ellos. A mis hermanos Jona y Daniela, por los momentos tan agradables y graciosos que pasamos juntos.

En especial dedico este trabajo a dos personitas con un espíritu hermoso, que me han inspirado en todo momento por su generosidad, mis abuelitas Cata y Paz. A mis abuelitos que tan solo se adelantaron pero que al igual que mis abuelitas, estarían apoyándome.

A mis tías Lucy, Rosy, Mary, Katy, Lilia, Laura y tíos Carlos, Ricardo, Alfredo, Gilberto, Mario e Ismael, que los quiero mucho porque se preocupan por mí y siempre están al pendiente de mis necesidades. A todos mis primos y primas Melissa, Gladys, Edgar, Julio, Brenda, Laura, Pepe y Diana que más que primos son como mis hermanos.

Gracias al Dr. Manuel Jiménez Estrada por haber confiado en mi persona, por la paciencia y por la dirección de este trabajo. Al Ingeniero Raúl Ramón Mora por los consejos, el apoyo y el ánimo que me brindó. Al Dr. Alejandro Rogel por su ayuda y disposición en todo momento, al Ingeniero Rafael Coello por su atenta lectura de este trabajo, sugerencias e ideas, a la Ingeniera Balbina Patricia por sus atinadas correcciones y al Mtro. Esteban Minor por sus comentarios en todo el proceso de elaboración de la Tesis. A los chicos del laboratorio 210 por mi estancia tan divertida mientras realizaba mi trabajo. Gracias también a mis queridos compañeros de la carrera, a nuestro grupo los Azeótropos de Zaragoza que me apoyaron y me permitieron entrar en su vida durante estos casi 5 años de risas, presiones, molestias y su incomparable amistad, a Rogelio, Vane, Ruthy, Marisol, Oscar, Emilio, Ana, Chucho y Julio, muchas gracias.

A mis amigos de toda la vida, por todas las cosas increíbles que hemos pasado y mostrarme el significado de amistad incondicional, Sandra, Maileá, Giovanna, Daniela, Eduardo, Cesar, Daniel, Marisol y Fernanda.

Por último quiero agradecer a una peluda de 4 patas que se llama linda, que desgraciadamente no sabe leer pero siempre estuvo a mi lado esperándome a pesar de lo tarde que fuera.

iii GRACIAS A TODOS!!!

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	5
RESUMEN	6
JUSTIFICACIÓN	7
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
OBJETIVOS	10
INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO 1	
MARCO TEÓRICO	
1.1 Acerca del mercurio	14
1.2 Contaminación por mercurio	16
1.2.1 Compuestos del mercurio	16
1.2.2 Efecto de los contaminantes en el suelo	18
1.2.3 Fuentes de emisión del mercurio	18
1.2.3.1 Amalgamación	19
1.2.3.2 Proceso de obtención del mercurio	19
1.2.3.3 El mercurio en el ambiente	20
1.2.3.4 El ciclo del mercurio	20
1.2.4 Daños a la salud	22
1.2.5 Contaminación por mercurio en el mundo	24
1.2.6 Contaminación por mercurio en México	25
1.2.6.1 Plantas de cloro-álcali	26
1.2.6.2 Rellenos sanitarios	26
1.2.6.3 Cuerpos de agua	26
1.3 Normatividad	28
CAPÍTULO 2	
MÉTODOS DE REMEDIACIÓN	
2.1 Remedación In situ	31
2.1.1 Biodegradación in situ	32
2.1.2 Vitrificación	32
2.1.3 Degradación química	33
2.1.4 Estabilización / solidificación	33

2.1.5 Lavado del suelo	33
2.1.6 Aireación del suelo	33
2.2 Remedación Ex situ	34
2.2.1 Tratamientos químicos	34
2.2.2 Degradación biológica (compostaje)	34
2.2.3 Extracción o lavado de suelos	34
2.2.4 Depósito de seguridad	35
2.2.5 Desorción térmica	35
2.3 Remedación en México	36
2.4 Remedación en el mundo	37

CAPÍTULO 3 FITORREMEDIACIÓN

3.1 Tipos de fitorremediación	39
3.2 Ventajas y desventajas	40
3.3 Plantas acumuladoras	41
3.4 Determinación del área contaminada	44
3.5 Elección de la planta	47

CAPÍTULO 4 MÉTODO

4.1 Plan de trabajo	48
4.1.1 Detalles del plan de trabajo	49
4.1.1.1 Personal de trabajo	49
4.1.1.2 Verificación del lugar	49
4.1.1.3 Objetivo meta	51
4.1.1.4 Estudio del suelo	51
4.1.1.5 Análisis de la planta	55
4.1.1.6 Tiempo requerido para descontaminar	58
4.1.1.7 Costos	58
4.1.1.8 Seguridad de implementación	59
4.1.1.9 Implementación a mayor escala	60
4.2 Determinación de una población de plantas	61
4.3 Estimación del tiempo para disminuir la contaminación de mercurio	62
4.4 Tratamiento de residuos	63

RESULTADOS -----	73
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES -----	79
BIBLIOGRAFÍA -----	81

ANEXOS -----	85
A. Estimación de las Emisiones de mercurio en México en 1998.	
B. Consumo de mercurio en México en 1998.	
C. Minas de mercurio en México.	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estructura química-----	15
Tabla 2. Normatividad del mercurio en México-----	28
Tabla 3. Normas Oficiales Mexicanas para regular el uso del mercurio-----	29
Tabla 4. Límites permisibles internacionales de mercurio para uso de suelo-----	30
Tabla 5. Datos clínicos reportados en una población expuesta a metales pesados-----	51
Tabla 6. Resultados de las muestras de Hg, PB y Ag en suelos de la Zacatecana-----	54
Tabla 7. Resultados de Hg en el marrubio-----	56
Tabla 8. Factor de Bioacumulación de Hg en el Marrubio-----	57
Tabla 9. Ahorro de costos estimados a través de fitorremediación -----	59
Tabla 10. Ventajas de los costos de fitorremediación de suelos -----	59
Tabla 11. Porcentaje de remoción-----	73
Tabla 12. Plan de trabajo-----	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Personas intoxicadas por mercurio-----	9
Figura 2. Mercurio (Hg) -----	14
Figura 3. Minería-----	19
Figura 4. Ciclo del mercurio-----	21
Figura 5. Desorción térmica-----	35
Figura 6. Tecnologías de remediación de suelos utilizadas en México-----	36
Figura 7. Tipos de fitorremediación -----	40
Figura 8. Municipio de Guadalupe-INE -----	46
Figura 9. Yarumo y vetiver-----	47
Figura 10. Mapa de muestras en la comunidad “La Zacatecana”-----	50
Figura 11. <i>Marrubium vulgare</i> -----	55
Figura 12. Horno rotatorio-----	69
Figura 13. Condensador de carcasa y serpentín-----	70
Figura 14. Scrubber-----	71

RESUMEN

El uso de los compuestos de mercurio, que son altamente peligrosos para la salud humana y el medio ambiente, están severamente restringidos debido a que el Hg puede depositarse en sitios aledaños a la zona de emisión. Este problema se suscita mundialmente debido al egoísmo y la falta de conciencia de lo que nos afecta día a día por nuestras actividades.

Es por eso que estamos obligados a buscar maneras de remediar nuestro ambiente, por lo tanto diversos procesos de limpieza de contaminantes se aplican en nuestro país y en todo el mundo, con el fin de terminar con los graves problemas de polución; lamentablemente la mayoría de ellos son muy costosos. Por otro lado, la botánica, la ingeniería y otras disciplinas se han asociado para proponer nuevas soluciones a estos problemas a través de tecnologías de fitorremediación.

En este trabajo se ha planteado el objetivo de armar y proponer un paquete de fitorremediación, en el cual se ha investigado en forma general para tener una idea completa de lo que implicaría realizar todo este proceso en forma real y llegar a un máximo permisible de metales pesados en el ambiente de acuerdo a normas nacionales para minimizar riesgos de salud de las poblaciones cercanas a zonas que conviven desde el tiempo de la colonia con metales pesados o cualquier tipo de contaminantes peligrosos.

Se propone teóricamente el marrubio como planta fitoacumuladora para tratar suelos de la Zacatecana en Zacatecas y así llegar al máximo permisible de 23ppm de Hg como lo dice la NORMA Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, se debe obtener una población de plantas y se calcula el tiempo en el cual quedará remediado el suelo de esta zona; incluyendo un plan de trabajo desde la investigación hasta la implementación del paquete de fitorremediación en forma real.

Entre varios posibles tratamientos, se muestra una propuesta de un proceso de reciclado y purificación de mercurio, iniciando al cosechar las plantas para quemarlas en un horno de rotatorio, se condensa el mercurio y se destila a vacío para tener mayor porcentaje de pureza, los incondensables pasan a un adsorbedor de gases y después a un filtro de carbón activo para minimizar los contaminantes a la atmósfera. El mercurio ya en estado líquido con un 98% de pureza es confinado a vertederos de seguridad en una forma más estable y menos peligrosa para la población y el ambiente.

JUSTIFICACIÓN

Hoy en día la contaminación por mercurio representa un problema ambiental global. Existen diferentes sitios en el mundo (incluyendo México) en espera de ser rehabilitados.

El mercurio es un compuesto químico ampliamente utilizado desde la antigüedad para diversos fines. Actualmente se utiliza en la industria, principalmente en la minería, la siderurgia, la producción de cloro, etc. La peligrosidad de este compuesto radica en su elevada toxicidad y la facilidad de ser asimilado por los seres vivos.

En México desde la época de la colonia, los españoles generaron procesos de extracción de plata, los cuales dejaron enormes cantidades de contaminación de mercurio que afectan en mayor proporción los suelos de las zonas mineras y desde entonces surgen los riesgos graves para la salud de la población y el ambiente por este tóxico metal.

Este impacto nocivo comienza con el traslado de los residuos contaminantes desde el sitio de origen hacia lugares no contaminados, ya sea por lixiviación, transportación eólica, ó fluvial, o mediante la incorporación a redes tróficas cuando un organismo queda expuesto al contaminante al beber o ingerir sustancias que lo contengan, al respirar o simplemente al tener contacto con él.

Existen diversas tecnologías de remediación que ya se aplican en nuestro país con el fin de limpiar las áreas contaminadas; lamentablemente la mayoría de ellas son muy costosas. Por otro lado, la botánica, la ingeniería y otras disciplinas se han asociado para proponer nuevas soluciones a estos problemas a través de tecnologías de biorremediación. Sin embargo, existe aún la necesidad de que los investigadores y organismos relacionados compartan las experiencias y resultados obtenidos en el campo y en laboratorio, para la búsqueda de las combinaciones y de sistemas más efectivos que se adapten a las situaciones especiales de las zonas contaminadas. La tecnología en donde se utilizan plantas (árboles, arbustos, pastos, etc.) para reciclar nutrientes y tratar residuos semisólidos y líquidos, así como para limpiar medios contaminados con metales tóxicos y compuestos orgánicos y otros elementos ya está disponible, y cada vez es más aceptada. Esta tecnología ha sido denominada **fitorremediación**, la cual es una tecnología emergente que ofrece altos rendimientos y bajos costos de operación. Por otra parte es estética y naturalmente amigable con el ambiente.

La US-EPA (US Environmental Protection Agency) definió a la fitorremediación como una tecnología emergente que emplea plantas para degradar, extraer, contener o inmovilizar los contaminantes del suelo y agua. Las plantas son seleccionadas de acuerdo a su habilidad para tratar con los contaminantes y por su adaptabilidad a otros factores

específicos del sitio, tales como el clima, la profundidad de sus raíces y su facilidad de desarrollarse en el tipo de suelo disponible.

En este caso se utilizará una planta previamente estudiada llamada *Marrubium vulgare* (marrubio), que es una fanerógama de la familia de la Lamiaceae, nativa de Europa, norte de África, y Asia. Se sugiere su uso para la fitorremediación por la facilidad de adaptarse en ambientes variados y la capacidad absorbedora de metales pesados conforme a informes científicos recientes.¹⁻²

Al finalizar la fitorremediación es importante pensar con ayuda de la ingeniería, en un manejo adecuado para las plantas al ser cosechadas, es por eso que se proponen técnicas para tratar el mercurio que se recupera de los suelos con un proceso de reciclado y purificación del Hg, procurando reducir la concentración de mercurio en determinados medios ambientales y los flujos entre ellos, de modo que se aproximen a los niveles de concentración naturales, y se evite o minimice la exposición de los ecosistemas, peces, vida silvestre y seres humanos a concentraciones que excedan las que se originan naturalmente en medios ambientales.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sitios reportados con contaminantes llegan a concentrar una gran cantidad de residuos químicos peligrosos, tanto orgánicos como inorgánicos (por actividades de la industria minera y petroquímica principalmente).

Para dar un buen manejo a estos materiales peligrosos, se les debe depositar en confinamientos y/o rellenos sanitarios adecuados, aunque la realidad indica que la mayor parte tiene por destino la disposición clandestina (por ejemplo, en tiraderos no controlados, terrenos baldíos, patios de empresas, drenajes, etc.), donde quedan diseminados y a la intemperie. O peor aún, se vierten en ríos, lagunas o en el mar sin tratamiento alguno, generando así un continuo aumento en sitios contaminados con sustancias peligrosas los que en nuestro país incluyen a casi todas las cuencas hidrológicas.

En las aves y los mamíferos que se alimentan de los peces están más expuestos al mercurio que otros animales en los ecosistemas acuáticos. De igual manera, los predadores que comen animales que se alimentan de los peces pueden tener una exposición elevada. A niveles altos de exposición, los efectos dañinos del mercurio metálico en estos animales incluyen la muerte, la reproducción reducida, el crecimiento y desarrollo reducido y el comportamiento anormal

Esta situación también perjudica la salud de los seres humanos al alimentarse de peces o aves contaminadas con mercurio, afectando el sistema nervioso central y puede generar algunas deficiencias motrices, así como parálisis y apoplejías, consecuencia de su acumulación en el cuerpo; y no sólo afecta a los seres vivos, si no

figura 1. Personas intoxicadas por Hg.



a componentes ambientales tan importantes como el suelo y el agua, ya que la contaminación, en conjunto con otros factores como la erosión, la desertificación y el cambio de uso de suelo, han generado que la superficie del suelo que se degrada sea mayor a 30,000 km² en México³

OBJETIVOS

General

Obtener información científica suficiente para proponer un sistema de fitorremediación de sitios contaminados con mercurio en México incluyendo el tratamiento de las plantas con los contaminantes al cosecharlas.

Específicos

- Realizar una búsqueda bibliográfica de la planta que permita dar una solución factible al problema de contaminación por mercurio en suelos de la Zacatecana en Zacatecas.
- Establecer la cantidad teórica de plantas necesaria para llegar al máximo de toxicidad de mercurio permitida de acuerdo a normas nacionales en un área determinada.
- Calcular el tiempo que necesitan las plantas para acumular contaminantes de acuerdo a su ciclo de vida y al mismo tiempo llegar al máximo de toxicidad de mercurio permitido conforme a normas nacionales.
- Proponer un proceso de tratamiento de residuos finales de la fitorremediación de suelos con mercurio, tras cosechar las plantas del área contaminada.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población y el avance de las actividades industriales causan serios problemas de contaminación ambiental. Los países generan cada año más desperdicios, muchos de ellos no biodegradables o que se degradan muy lentamente en la naturaleza, lo que provoca su acumulación en el ambiente sin tener un destino seguro o un tratamiento adecuado para minimizar daños de polución. De este modo, en lugares donde no existe control sobre la emisión y el tratamiento de los desechos, es factible encontrar una amplia gama de contaminantes. Usualmente, los casos de mayor atención de contaminación en la prensa son los derrames de petróleo. Pero, en el mundo constantemente suceden eventos de impacto negativo sobre el medio ambiente, incluso en el entorno directo de las grandes masas humanas, generados por un gran abanico de agentes contaminantes que son liberados al ambiente. Un ejemplo lo conforman variedad de industrias químicas que producen compuestos cuya estructura química difiere de los compuestos naturales, y que son utilizados como refrigerantes, disolventes, plaguicidas, plásticos y detergentes. El problema principal de estos compuestos es que son resistentes a la biodegradación, por lo cual se acumulan y persisten en el ambiente, perjudicando a los seres vivos y por lo tanto a nosotros mismos por muchos años.

Una fuente importante de contaminación por metales pesados en México la constituyen las actividades mineras. Estas actividades generan contaminación por descargas y liberación de subproductos en la extracción de metales. Desde épocas coloniales diferentes residuos mineros de metales tóxicos quedaron incorporados en fracciones de suelos a lo largo del país. Unos de los metales tóxicos presentes de manera común en los jales de más minas mexicanas es el mercurio (Hg), elemento que se caracteriza por su alta toxicidad.

El mercurio es un elemento natural que puede existir en diversas formas, ya sea como elemento o en un compuesto químico; tiene una gran variedad de propiedades físico-químicas únicas. Es el único metal que en forma pura, es líquido a temperatura ambiente y se caracteriza por ser volátil. Deriva su nombre en latín *hydrargyrum*, “plata líquida”. El Hg conduce la electricidad y se expande a una tasa constante en respuesta a cambios de presión o temperatura. Cuando se combina con otros gases puede formar moléculas más complejas que pueden emitir luz al paso de corriente. También se caracteriza por formar mezclas maleables con otros metales generando “amalgamas”. Estas características han permitido una gran cantidad de aplicaciones del mercurio en ámbitos comerciales e industriales.

Este tóxico metal, puede estar presente en el aire, el suelo y el agua; en el ambiente el Hg puede ser transformado en un complejo orgánico: el metilmercurio, forma más tóxica de este elemento. Los daños al ambiente y a la salud, resultado de la exposición al Hg, han captado la atención durante los últimos años. Diferentes eventos de contaminación en el mundo han mostrado su peligrosidad para el ser humano, así como el grave daño causado al ambiente como resultado de un mal manejo del Hg en actividades industriales y comerciales.

En las últimas décadas, entre las técnicas empleadas para contrarrestar los efectos de los contaminantes, se comenzó a utilizar una práctica llamada biorremediación. El término biorremediación fue acuñado a principios de la década de los ochenta, y proviene del concepto de *remediación*, que hace referencia a la aplicación de estrategias físico-químicas para evitar el daño y la contaminación en suelos. Los científicos se dieron cuenta que era posible aplicar estrategias de remediación que fuesen biológicas, basadas esencialmente en la observación de la capacidad de los microorganismos de degradar en forma natural ciertos compuestos contaminantes, y así mismo la capacidad de algunas plantas para acumularlos.

Las plantas tienen diferentes propiedades naturales que las convierten en prospectos ideales para ser usados en la limpieza de aire, suelos y cuerpos de agua contaminados; a través de un proceso denominado fitorremediación. La fitorremediación es una tecnología emergente, que utiliza a las plantas y microorganismos asociados a la rizósfera para extraer metales tóxicos del suelo o bien inmovilizarlos. Algunos de los mecanismos usados por las plantas para hacer frente a los contaminantes incluyen: la fitoextracción, la fitoacumulación, la fitoestabilización y la fitovolatilización.

Los sitios contaminados a menudo albergan especies de plantas particulares. Estas especies han podido adaptarse con éxito a las condiciones generadas en un suelo contaminado; algunas pueden acumular altas concentraciones de metales pesados en sus tejidos. La mayoría de las plantas sobreviven en suelos contaminados, lo hacen ya sea al evitar la incorporación de los metales pesados o hiper-acumulándolos en sus tejidos. Hasta la fecha se han identificado más de 400 especies hiperacumuladoras, la mayoría de las cuales han sido encontradas en sitios contaminados.

México se caracteriza por ser un país megadiverso, con una gran riqueza en especies de plantas; por otro lado, existen en el país más de 20 sitios identificados por tener concentraciones elevadas de Hg. Es necesario conocer las plantas que habitan en estos

sitios contaminados, con la finalidad de poder determinar si estas pueden ser usadas como acumuladoras de Hg en tecnologías de biorremediación.

Muchas veces es necesario de la ayuda de la ingeniería después de la biorremediación para los contaminantes que son resistentes a la biodegradación, ya sea para tratarlos mediante procesos químicos y estabilizarlos o en diseñar sitios para almacenarlos en vertederos especializados y así asegurar que no sigan su propagación por todo el planeta disminuyendo el daño que están causando.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 ACERCA DEL MERCURIO

El mercurio (Hg) es un elemento metálico, de color plateado que permanece en estado líquido a temperatura ambiente. Su número atómico es de 80 y es uno de los elementos de transición del sistema periódico.⁴



A temperatura ambiente, es ligeramente volátil, denso y se solidifica a una presión de 7,640 atmósferas (5, 800,000 mm Hg). Se disuelve en ácido nítrico y en ácido sulfúrico concentrados, pero es resistente a los álcalis. Tiene un punto de fusión de $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$, un punto de ebullición de $357\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una densidad relativa de 13.5. Su masa atómica es 200.59⁵

Figura 2. Mercurio (Hg)

Se presenta en la naturaleza bajo diferentes modalidades, ya sea en forma metálica, de vapor o gas, combinado con otros elementos (como cloro, azufre y oxígeno) para formar sales inorgánicas, o bien formando compuestos orgánicos (como el metilmercurio o el fenilmercurio), los cuales también pueden presentarse en forma de sales a través de procesos naturales, en los que pueden intervenir microorganismos: el mercurio inorgánico puede ser transformado en mercurio orgánico.

Forma sales en dos estados de oxidación: mercurio (I) y mercurio (II). Las sales de mercurio (II) o mercúricas son mucho más comunes que las sales de mercurio (I). La mayoría de los compuestos inorgánicos de mercurio son polvos blancos o cristalinos, excepto el sulfuro de mercurio (también conocido como cinabrio) que es rojo y se torna blanco al exponerse a la luz.

A continuación se presentan algunos de los compuestos inorgánicos de mercurio más comunes en la corteza terrestre.⁵

- HgCl cloruro mercurioso
- HgCl₂ cloruro mercúrico
- HgO óxido mercúrico
- HgS sulfuro mercúrico (cinabrio)
- Hg(NO₃)₂ nitrato de mercurio
- HgSO₄ sulfato de mercurio
- Hg(ClO₄)₂ perclorato de mercurio
- Hg(CNO)₂ cianato de mercurio (fulminato)
- Hg(OH)₂ hidróxido de mercurio

El mercurio también forma compuestos organometálicos. Estos se encuentran caracterizados por la unión del mercurio a uno o dos átomos de carbono para formar compuestos del tipo: RHgX y RHgR' , en donde R y R' representan el sustituyente orgánico o cadenas de carbonos de longitud variable. Cabe destacar que el enlace carbono-mercurio es químicamente estable y no se rompe en presencia de agua ni ácidos débiles o bases. La estabilidad no se debe a la fuerza del enlace carbono-mercurio sino a la poca afinidad del mercurio por el oxígeno.

Desde el punto de vista toxicológico, los compuestos organometálicos más importantes son la subclase de los alquilvercuriales de cadena corta, en los que el mercurio está unido al átomo de carbono de un grupo metilo, etilo o propilo.

Algunos de estos compuestos organometálicos (etil y propil mercurio) se utilizan en la industria y otros en la agricultura. Estos compuestos organometálicos son estables; sin embargo, algunos se descomponen fácilmente por acción de los organismos vivos, mientras que otros no pueden ser biodegradados.

Es importante señalar que es en su forma elemental (Hg^0) cuando el mercurio es más tóxico. Aunque no se conocen completamente todos los sitios de metilación del mercurio en el ambiente, se han identificado a los medios acuáticos como los más importantes. El mercurio procedente de las descargas industriales presenta principalmente las siguientes combinaciones químicas:

Tabla 1. Estructura química

Estructura química	Nombre
Hg^{2+}	Mercurio divalente
Hg^0	Mercurio metálico
$\text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}^+$	Fenilmercurio
$\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{Hg}^+$	Alcoxialquilo de mercurio
CH_3Hg^+	Metilmercurio

En orden de toxicidad, el metilmercurio y el fenilmercurio son los compuestos de mayor preocupación por la facilidad de biodisponibilidad que tienen en la cadena alimenticia.⁵

1.2 CONTAMINACIÓN POR MERCURIO

El Hg, al igual que cualquier otro elemento químico, no puede ser degradado y no puede ser destruido por combustión para ser eliminado del ambiente. Este metal entra al ambiente por fuentes naturales y antropogénicas⁶ y resulta ser un contaminante con gran impacto, debido a la alta movilidad que presenta el aire, el agua, el suelo y sus interfaces.

El Hg es considerado como un contaminante global, debido a la capacidad de transporte a grandes distancias en la atmósfera. Esta capacidad está dada por la volatilidad característica del Hg elemental (Hg^0). La cual permite al elemento circular en el ambiente a través de diferentes pasos: emisión a la atmósfera, transporte, deposición y re-emisión. Posterior a su liberación a la atmósfera y dependiendo de la forma química o física en que se ha liberado, el Hg puede depositarse en sitios aledaños a la zona de emisión, o bien estar sujeto a un transporte atmosférico a grandes distancias por medio de masas de aire continentales.⁶

1.2.1 Compuestos del mercurio.

Los compuestos de mercurio, en su mayoría son productos químicos altamente peligrosos para la salud humana y el medio ambiente. Su uso está severamente restringido. Las restricciones comprenden todas las formulaciones y usos de productos para protección de plantas que contengan compuestos de mercurio, incluyendo compuestos inorgánicos, alquílicos, alcoialquílicos y arílicos.

En su forma pura se le conoce como mercurio "elemental" o "metálico" (Hg^0). Rara vez se le encuentra en su forma pura, como metal líquido; es más común en compuestos y sales inorgánicas. En existen tres estados de oxidación: metálico Hg^0 , mercurioso Hg^+ y mercúrico Hg^{++} . Como ya se ha mencionado antes, a partir del mercurio divalente (Hg^{2+} ó $\text{Hg}(\text{II})$) o del estado mercurioso se pueden formar muchos compuestos orgánicos e inorgánicos de mercurio.

Fenilmercurio ($\text{C}_6\text{H}_5\text{Hg}^+$)

Estrictamente hablando, el fenilmercurio es un catión, que forma compuestos orgánicos de mercurio tales como el acetato de fenilmercurio y el cloruro de fenilmercurio. Ambos se utilizan como fungicidas. A veces se utiliza el término "fenilmercurio" para referirse a compuestos de fenilmercurio. Cabe destacar que es una de las formas más tóxicas en las que se encuentra el mercurio ya que puede ser absorbido con facilidad y causar fatales consecuencias.

Metilmercurio (CH_3Hg^+)

Es un catión organometálico. Se trata de un compuesto neurotóxico capaz de concentrarse en el organismo (bioacumulación) y concentrarse así mismo en las cadenas alimentarias (biomagnificación), que ocupa un lugar especial debido a que un cierto porcentaje de la población mundial está expuesta a él de una forma u otra y su toxicidad está mejor caracterizada por la investigación médica que la de otros compuestos orgánicos del mercurio. Sus efectos contaminantes son de especial relevancia en los alimentos para los bebés y en los que toman las mujeres durante el embarazo, ya que en éste último caso se transfiere por vía de la placenta al feto.

Cloruro mercurioso (HgCl)

El cloruro mercurioso (calomelano): Es una sustancia blanca, insoluble en el agua y alterable a la luz. Se utiliza en medicina como desinfectante intestinal y en forma de pomadas para tratar enfermedades en la piel. Se usa también para electrodos.

Cloruro mercúrico (HgCl_2)

Es un sólido cristalino (como la arena) o polvo blanco. Se emplea en la fabricación de otras sustancias químicas, como insecticida, desinfectante, fungicida y preservador de la madera, y en las pilas secas y la impresión de textiles.

Es muy venenoso y peligroso por su gran solubilidad en agua.

Óxido mercúrico (HgO)

Tiene una apariencia sólido cristalina (partículas finas) de un color rojo o amarillo, inoloro con una solubilidad baja. Se emplea en las celdas de mercurio, pinturas antisuciedad y como catalizador. Estable bajo condiciones ordinarias de uso y de almacenaje. Se descompone en contacto con la luz en mercurio y oxígeno. A $400\text{ }^\circ\text{C}$ se vuelve casi negro, pero se vuelve rojo otra vez al enfriar.

Sulfuro mercúrico (HgS - cinabrio)

Es un mineral de color rojo cochinilla, aunque debido a las impurezas puede ser rojo escarlata o pardo rojizo, rojo amarillento más o menos y en ocasiones obscuro púrpura. Está compuesto en un 85% por mercurio. Es la Mena más importante del mercurio, que es usado para amalgamaciones y aparatos científicos. Al quedar expuesto a la luz, el cinabrio se oscurece. Este compuesto del mercurio también es altamente tóxico por ingestión o inhalación del polvo.

Nitrato de mercurio ($\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$)

Es un componente del mercurio, se presenta en polvo blanco o ligeramente amarillento, sin olor. Higroscópico y sensible a la luz, es un producto Muy tóxico por inhalación, por ingestión y en contacto con la piel. Peligro de efectos acumulativos. Muy tóxico para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático. Se usa en el laboratorio para investigaciones, análisis y química fina.

Sulfato de mercurio (HgSO_4)

Tiene una apariencia de gránulos o polvos cristalinos blancos, sin olor, es tóxico y corrosivo en especial por los vapores. A altas temperaturas y en presencia de luz se descompone. Es una sustancia peligrosa para el ambiente, especialmente en el acuático ya que se presenta alta biodisponibilidad.

Cianato de mercurio (fulminato) $\text{Hg}(\text{CNO})_2$

Tiene forma de cristales blancos, es soluble en agua, en solventes orgánicos y se usa como detonador de explosivos. Es una sustancia extremadamente sensible y tóxica. Debe almacenarse en un lugar fresco, seco, y alejado de roces o golpes.⁴

1.2.2 Efecto de los contaminantes en el suelo.

El suelo se puede degradar al acumularse en él sustancias a unos niveles tales que repercuten negativamente su comportamiento. Los efectos desfavorables son:

1. Destrucción del poder de autodepuración por procesos de regeneración biológica normales, al haber superado la capacidad de aceptación del suelo.
2. Disminución cualitativa y cuantitativa del crecimiento normal de los microorganismos del suelo, o bien alteración de su diversidad.
3. Disminución del rendimiento de los cultivos con posibles cambios en la composición de los productos con riesgo para la salud de los consumidores, al entrar elementos a la cadena trófica.
4. Contaminación de las aguas superficiales y freáticas por procesos de transferencia. Se alcanzan concentraciones superiores a las consideradas aceptables.
5. Disminución de las funciones de soporte de actividades de esparcimiento del contaminante. Los espacios contaminados presentan problemas de salubridad para los usuarios.⁷

1.2.3 Fuentes de emisión del mercurio

Las principales fuentes de contaminación por mercurio son las naturales debido a los desprendimientos o el desgaste de la corteza terrestre, y la causada por el hombre en los procesos industriales, que es la más importante y la que causa el 75 por ciento de las contaminaciones.

Principales actividades que utilizan o liberan mercurio en el ambiente

- Extracción de oro y plata.
- Producción de energía térmica (termoeléctricas).
- Manufactura de equipos eléctricos y científicos como baterías, termómetros, barómetros, termostatos, tubos fluorescentes, lámparas de mercurio, rectificadores de arco de mercurio, medidores directos de corriente, entre otros.
- Fabricación de pinturas, pesticidas y cosméticos.

- Amalgamación de plata y zinc en odontología.
- Obtención de Cloro (producción electrolítica de sodio y cloro).
- Jales de minería de yacimientos de mercurio.



Figura 3. Minería

1.2.3.1 Amalgamación

La amalgamación es un proceso que se aplica para recuperar oro y plata nativa de materiales auríferos o argentíferos. El oro, la plata y varios otros metales y sus compuestos son capaces de alearse con el mercurio. Dichas aleaciones se conocen como amalgamas. La amalgamación en la minería aurífera sirve para recuperar el oro en forma de amalgama y así separarlo de los minerales acompañantes. La amalgama se forma por el contacto entre mercurio y oro en una pulpa con agua. El mercurio puede estar presente en forma de "perlas" dispersas en la pulpa o extendido sobre una superficie (planchas amalgamadoras).

Algunas de las causas por las cuales este proceso causa problemas graves de contaminación es por el mal manejo de su método, entre los cuales se encuentra el uso de Hg en circuitos de flujo abierto, la quema de amalgamas al aire libre y almacenamiento inseguro de colas de amalgamación.

Su uso en pesticidas, conservadores de semillas, pinturas y cosméticos se han restringido en algunos países, pero todavía existen muchas compañías que lo emplean.⁵

1.2.3.2 Proceso de obtención del mercurio

La producción del mercurio incluye no sólo su extracción primaria, sino también la producción secundaria que viene dada por el reciclaje, la recuperación y la reutilización del mercurio en procesos industriales.

La mayoría de los depósitos minerales se encuentran a niveles relativamente superficiales

(desde unos pocos metros hasta 700 metros). La explotación de gran parte de estos depósitos es a partir de excavaciones subterráneas, pues los depósitos suelen ser demasiado pequeños e irregularmente distribuidos como para hacer rendibles minas abiertas.

El método más utilizado es sencillo y barato, se prepara por tostación del cinabrio, a una temperatura de unos 600° C. El mercurio se volatiliza y sus vapores son conducidos a dispositivos de condensación herméticamente cerrados, donde el mercurio se condensa y se recoge en estado líquido.

Otro método para purificar este metal, es tratarlo con ácido nítrico diluido, el cual oxida los demás metales, dejando libre el mercurio, que por último se lava con agua, se seca y se destila al vacío.

Existen dos categorías básicas en la producción secundaria del mercurio: recuperación de mercurio líquido procedente del desmantelado de equipamiento e industrias obsoletas, y recuperación a partir de productos de desecho por técnicas extractivas. Desde el punto de vista de las cantidades, el mercurio recuperado como mercurio líquido es mucho mayor que el recuperado por técnicas extractivas.

La segunda categoría comprende el tratamiento de productos de desecho que contienen Hg, residuos industriales y fangos. El método más común es el tratamiento térmico, donde los productos de desecho son sometidos a temperaturas de hasta 538°C para vaporizar el mercurio.⁸⁻⁹

1.2.3.3 El mercurio en el ambiente

Este metal es liberado a la atmósfera por los volcanes, los incendios forestales, la combustión del carbón, etc. Puede depositarse en lagos y ríos, donde se acumulará en los tejidos de los peces. De este modo, ciertas especies de pescado han dejado de ser comestibles y otras lo son sólo de forma limitada. Una vez depositado en el sedimento, las bacterias presentes en el cuerpo de agua lo absorben y lo transforman en metilmercurio, la forma más tóxica del metal.

El metilmercurio del sedimento es tomado por organismos microscópicos (plancton) que a su vez son el alimento de los peces pequeños y estos de los grandes, viajando a través de la cadena alimenticia hasta alcanzar el hombre, en donde aparecen las concentraciones más altas.⁶

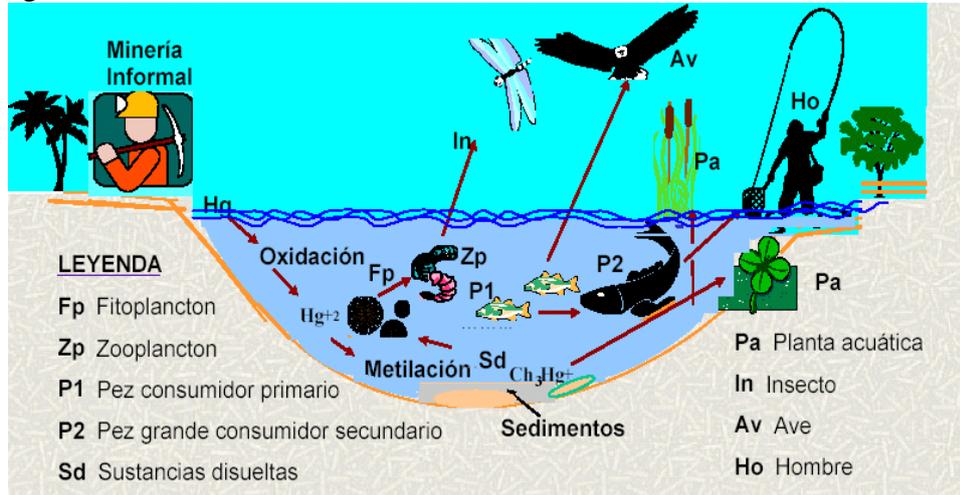
1.2.3.4 El ciclo del mercurio

Se define como ciclo del mercurio el flujo continuo de mercurio entre atmósfera, tierra y agua. Este ciclo está basado en el comportamiento del Hg en los diferentes medios, en las reacciones químicas implicadas, así como en parámetros de transporte y su destino final. En cualquier punto de la Tierra, la cantidad de mercurio presente será función del

ciclo global natural, el ciclo global perturbado por la forma antropogénica, y fuentes de mercurio.

Debido a la gran movilidad del mercurio dentro de su ciclo, su cuantificación se hace especialmente difícil.

Figura 4. Ciclo del mercurio.



El proceso de contaminación en la atmósfera se encuentra en la volatilización del mercurio en los medios acuáticos y marinos, la volatilización a partir de la vegetación, la liberación de gases de materiales geológicos y las emisiones volcánicas. En esta parte, aproximadamente el 95% del mercurio total está en estado elemental, Hg⁰, es oxidado lentamente al estado de Hg (II), éste tiene tiempos de residencia que oscilan entre horas y meses, ya que puede ser depositado con relativa facilidad tanto por vía húmeda como por vía seca. La mayor parte de esta oxidación tiene lugar en la interfase sólido-líquido de las gotas de niebla y nubes. Probablemente el ozono es el principal oxidante de estos procesos, aunque también participan significativamente el HClO, HSO₃⁻ y OH⁻.

En contraste con el mercurio inorgánico, el mercurio elemental no es susceptible a ninguno de los principales mecanismos de deposición seca, a la vez presenta una muy baja solubilidad en agua. Sin embargo, el mercurio elemental puede ser depositado a través de una serie de mecanismos que implican su conversión a mercurio inorgánico en las propias gotas de agua en las nubes. Algunas ecuaciones se muestran a continuación:



Aunque el Hg (II) producido por el ozono pueda ser devuelto en forma Hg (0) a partir de la reacción con sulfito, la ecuación (2) tiene una cinética mucho más rápida por lo que el resultado final es la acumulación de Hg (II).

El retorno del mercurio desde la atmósfera hacia la **superficie de la tierra** ocurre principalmente por la vía de la precipitación húmeda del Hg (II) disuelto. La absorción del mercurio en aerosoles tales como el hollín también favorece su deposición, especialmente sobre la tierra, donde abundan los aerosoles. Como el Hg⁰ se reoxida relativamente de forma más lenta al estado mercúrico Hg (II), su tiempo de estancia en la atmósfera viene a ser de un año o quizás menos. Es tiempo suficiente para que el mercurio atmosférico se distribuya sobre la totalidad del planeta antes de volver a la tierra, mar y hielo.

Una vez oxidado el 60% del mercurio atmosférico se deposita en la tierra y el 40% en el agua, a pesar de que la tierra representa solamente el 30% de la superficie terráquea. La mayor proporción de depósitos de mercurio en la tierra viene condicionada presumiblemente por la proximidad de sus fuentes dado que la precipitación de agua sobre la tierra es tres veces menor que sobre los océanos. **En las aguas oceánicas**, tras ser sometido a una serie compleja de reacciones químicas y biológicas, la mayoría de Hg II se reduce a Hg⁰ y vuelve a la atmósfera. Solo una pequeña fracción se exporta permanentemente a los sedimentos. Así el ciclo de Hg en la atmósfera y en la superficie del agua de mar están íntimamente relacionados eficazmente por precipitación-volatilización dirigido por reacciones de oxidación/reducción.

El mercurio (y en particular el metilmercurio) presenta una clara acumulación en las cadenas alimenticias costeras. Esta bioacumulación puede ser separada en dos grandes subgrupos, como son la comunidad de micro-invertebrados presente en los sedimentos bénticos y la comunidad del fitoplancton y zooplancton (así como peces plantívoros y piscívoros) que reside en la columna del agua (*Figura 1*).

El metilmercurio, puede ser demetilado, dando lugar a mercurio elemental que satura las capas superiores y acaba finalmente volatilizándose a la atmósfera.¹⁰

1.2.4 Daños a la salud

La toxicidad del mercurio y su efecto en la salud humana depende fuertemente de la clase de combinación y del estado de oxidación de éste. En contacto con la piel ocasiona dermatitis pero se absorbe poco por esta vía. La inhalación de vapores y polvos de compuestos de mercurio es la forma más frecuente de intoxicación.

En niveles altos, el mercurio metálico puede causar efectos al sistema nervioso y al feto que se desarrolla. Otras formas de mercurio pueden dañar otros órganos. Incluso en niveles bajos, el mercurio metálico puede causar problemas de salud. Exposición al mercurio puede comenzar a causar daño antes de que se presenten los síntomas. Una vez que se presenten los síntomas, problemas de salud relacionados con el envenenamiento del mercurio metálico pueden incluir temblor, cambios en la visión y

audición, insomnio, debilidad, dificultad con la memoria, dolor de cabeza, irritabilidad, timidez y nerviosismo, y una condición de salud llamada acrodynia.^{EPA}

Las mujeres embarazadas y sus fetos son especialmente vulnerables a los efectos tóxicos del mercurio metálico porque éste pasa fácilmente de la placenta al feto. El mercurio se puede acumular en concentraciones más altas en el bebé venidero que en la madre. Los niños jóvenes, que juegan a menudo en el suelo donde mercurio metálico fue derramado, corren riesgos de efectos al sistema nervioso central. Los vapores de mercurio son absorbidos fácilmente en la circulación sanguínea de los pulmones y el sistema nervioso central humano, que aún se desarrolla durante los primeros años de vida, también puede dañarse.

Efectos a la salud pueden resultar de la exposición a corto o a largo plazo. El cuerpo se deshace del mercurio mediante la orina y las heces fecales. La eliminación de esta sustancia del cuerpo puede tomar hasta varios meses después de la exposición. Acrodynia es caracterizada por picor, hinchazón, rubor; palmas de las manos y plantas de los pies roseadas; transpiración excesiva; sarpullido; irritabilidad; preocupación; somnolencia; insomnio; dolor en las coyunturas y debilidad.

Niños expuestos al mercurio metálico por períodos largos pueden tener problemas de aprendizaje en la escuela. Cuando los niveles de mercurio en el cuerpo son extremadamente altos, la terapia de "quelación" es necesaria. Bajo la terapia de "quelación", una sustancia química se introduce al torrente sanguíneo; la sustancia química se liga al mercurio para ayudar a la expulsión del cuerpo.^{EPA}

Cuando la exposición a metilmercurio es alta, los efectos pueden ser más pronunciados, pudiendo aparecer retardo mental y pérdida en la capacidad de coordinación de movimientos. Otros efectos complejos observados en niños cuyas madres son expuestas a niveles tóxicos de mercurio durante el embarazo incluyen ceguera, movimientos musculares involuntarios, convulsiones, debilidad muscular e incapacidad para hablar.

Aproximadamente el 80% del mercurio inhalado es absorbido por los pulmones y se reduce en un 50% en un lapso de 50 días (esta reducción a la mitad se produce cada 50 días)

En síntomas de envenenamiento agudo debido a inhalaciones de vapor de mercurio son: Dolor de pecho, dificultad para respirar, tos, sabor metálico, náuseas, diarrea, dolor abdominal, vómito, dolor de cabeza, en casos severos aparecen síntomas psicopatológicos y temblor de los músculos.

En envenenamientos por inhalar vapores de mercurio prolongadamente, se presentan los siguientes síntomas:

En exposiciones intensas aparecen síntomas bucales, renales, respiratorios y gastrointestinales; en exposiciones prolongadas son frecuentes los síntomas neurológicos. En la boca produce pigmentación de encías, salivación, temblor en la lengua, dificultad para hablar, alteración de la sensibilidad en la boca y en el olfato, irritación nasal, pérdida de apetito y anemia; neurológicamente lo más común es el

temblor, primero en parpados, labios y luego en extremidades, en casos graves rigidez, además de neuralgias, parestesias, ataxia y aumento del reflejo plantar. En ojos se disminuye la agudeza visual y opacación del cristalino. En efectos psicológicos se presenta irritabilidad, insomnio, disminución en la capacidad de concentración, melancolía, depresión, timidez, fatiga y alteraciones de la memoria.

Otro uso muy controvertido son las amalgamas dentales, ya que desprenden vapores tóxicos que afectan a los dentistas y a los técnicos dentales.

La mayor parte de estudiosos que han analizado este efecto aseguran que la gente que tiene amalgamas en los dientes o muelas no está expuesta a ningún riesgo de intoxicación ya que las cantidades de mercurio a las que se expone son mínimas.⁸

1.2.5 Contaminación por mercurio en el mundo

Como ya se ha mencionado anteriormente, este problema se suscita mundialmente, y a pesar de estar en la era de la tecnología no se ha logrado encontrar una solución a los enormes problemas de contaminación, y esto no es debido a la falta de capacidad humana, si no al egoísmo y la falta de conciencia conforme a lo que ocurre afectándonos a todos día a día.

Por esto mismo encontramos varias zonas en el mundo afectadas por este tóxico metal, como lo es el área de Almadén España, la cual es de las zonas más contaminadas del planeta, ya que ahí se encuentra el yacimiento más grande e importante conforme a la extracción de este metal, en consecuencia, es que este país intenta enfrentar esta situación tan grave investigando las formas más eficientes para aminorar este problema.¹

En Colombia, en un artículo, se menciona que ocupa el primer lugar como el mayor contaminador de mercurio por persona, derivado de la minería artesanal para la extracción de oro.¹¹

Japón lleva años implantando tecnologías más limpias en cuanto a las industrias que utilizan mercurio, tras el desastre de la bahía de Minamata en los años 50 y 60 donde fallecieron más de mil personas tras ingerir pescado envenenado con metilmercurio. Esto dio lugar a una enfermedad neurológica que era desconocida, ahora llamada la enfermedad de Minamata. Posteriormente se descubrió que el Hg procedía de una planta industrial de compuestos de vinilo y acetaldehído, cuyo reactor contenía un catalizador con 1% del metal.¹²

Otra grave intoxicación por contaminación de Hg ocurrió en Irak en 1971-1972, fue debida al consumo de harina de trigo cuyo grano había sido tratado previamente con el

fungicida etilmercurio-p-toluensulfamida. Se han repetido intoxicaciones al consumir granos destinados a la siembra usados para alimentación, como en el caso de Paquistán donde se contabilizaron 34 muertos intoxicados por trigo tratado con etilmercurio y acetato de MeHg.

En nuevo México en 1969, se intoxicaron 9 miembros de una familia por el consumo de carne de cerdo que habían sido alimentados con grano tratado con MeHg.

La polución mercurial de la cadena alimentaria es una de las consecuencias del ímpetu por la búsqueda de oro en la Amazonia. Desde finales de 1970 muchos ríos de su floresta, han sido explorados para la extracción de oro utilizando el Hg como amalgamador para separar las partículas finas de oro de las areniscas al formar un complejo Au-Hg. Durante este proceso, parte del Hg (5-30%) se descarga directamente en el río. Se ha calculado que anualmente se liberan al medio ambiente entre 90 y 120 toneladas de Hg. Esto es un indicativo de la magnitud de los problemas de la salud en los mineros y residentes locales y de la enorme contaminación de Hg que está afectando al Amazonas.

1.2.6 Contaminación por mercurio en México

En nuestro país, las actividades mineras en particular han generado un gran impacto en el ambiente ya que diferentes compuestos de Hg han quedado depositados en zonas mineras. En la actualidad tenemos más de 20 sitios a lo largo del país con más de 10 ppm de Hg en los primeros 2 metros de profundidad.

Los minerales de mercurio se encuentran localizados principalmente en las siguientes entidades federativas (en particular en el noroeste y centroeste del territorio): Aguascalientes, Chihuahua, Coahuila, Durango, Guanajuato, Hidalgo, México, Morelos, Nuevo León, Querétaro, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas, Tlaxcala y Zacatecas, ubicándose los principales yacimientos en los estados de: San Luis Potosí, Zacatecas, Querétaro, Guanajuato y Guerrero.

La minería en Zacatecas se caracterizó por el uso del proceso de amalgamación con mercurio (Hg) para la extracción de oro y plata. Este proceso generó grandes cantidades de residuos con alto contenido de metales, los cuales fueron arrastrados por ríos de la región y dispersados en los alrededores de la ciudad de Zacatecas. Estos residuos se han mantenido en la zona a lo largo de los años.⁵

En la época prehispánica destacó la explotación de cinabrio y azoque en el estado de Querétaro, particularmente en la Sierra Gorda, con lo cual la minería pasó a formar parte de la cultura y la historia de la región. Se sabe del impacto ambiental del mercurio en esta área, por investigaciones de especialistas nacionales y extranjeros que determinaron la

contaminación en la región y determinaron que podría ser la principal causa de las enfermedades crónicas del lugar.¹³

En Taxco Guerrero, se sabe de la importancia de los yacimientos minerales de plata desde hace muchos años, esto ha llevado a la presencia de metales pesados en los cauces naturales que son mal empleados como canales de desechos domésticos y tóxico-industriales, los cuales muchos de ellos son adaptados como calles y callejones, incluso en estas áreas contaminadas se les llega a dar un uso habitacional. Es por esto mismo que las enfermedades en esta zona han aumentado, como anemia, enfermedades en la piel, gastrointestinales, anencefalia, entre otras.¹⁴⁻¹⁵

1.2.6.1 Plantas de cloro-álcali

Las plantas de cloro-álcali son las principales consumidoras de mercurio en México. Actualmente operan en este país tres plantas de este tipo que emplean la tecnología de celdas de mercurio, las cuales producen en conjunto 147,000 toneladas de cloro anualmente. Estas plantas tienen en total 120 celdas de mercurio equipadas con ánodos de titanio. En promedio cada celda contiene 2,287 kg de mercurio, por lo que el inventario total de mercurio en estas plantas es de 275 toneladas aproximadamente con un consumo de 5.7 toneladas al año.⁵⁻¹⁶

1.2.6.2 Rellenos sanitarios municipales

De acuerdo con una estimación reciente del Instituto Nacional de Ecología (INE), en México se utilizan casi ocho toneladas de mercurio al año en la manufactura de diversos tipos de instrumentos y aparatos, tales como lámparas fluorescentes, termómetros, rellenos dentales e interruptores eléctricos, entre otros. Se estima que esta misma cantidad de mercurio se pierde en el ambiente por la rotura de estos instrumentos y aparatos, disponiéndose con los desechos sólidos en los tiraderos de basura o en los rellenos sanitarios municipales.⁵⁻¹⁶

1.2.6.3 Cuerpos de agua

Los resultados de la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua (RNM) muestran niveles de mercurio en varios cuerpos de aguas superficiales, cercanos al límite máximo recomendado de 0.001 mg/L. Se han detectado niveles de mercurio entre 0.5 y 1.0 ug/L en el río San Juan en Querétaro y en los ríos Tula, Tepeji, El Salto y Afajayucan en Hidalgo y en el río Salado en Coahuila.

Varios estudios independientes también han detectado la presencia de mercurio en aguas superficiales. Investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México realizaron varios estudios en la cuenca del río Coatzacoalcos, en la costa del Golfo de México, en el estado de Veracruz, y detectaron niveles de mercurio entre 3.0 y 63.0 ug/L en aguas superficiales y de 0.062 a 57.94 ug/L en sedimentos. También se encontraron

niveles de mercurio entre 0.2 y 0.4 ug/L en las aguas superficiales de las lagunas Del Carmen, Machona y Mecoacan en Tabasco, en la laguna Atasta en Campeche y en las lagunas de Tampamachopo y Mandinga en Veracruz.

En un estudio realizado por el Cinvestav en 1994, fueron identificadas tres cuencas como contaminadas con mercurio: 1) la cuenca del río Coatzacoalcos, el cual fluye por más de 220 kilómetros desde Oaxaca hasta el Golfo de México, en Veracruz, con niveles de mercurio hasta de 0.38 mg/l en la laguna Pajaritos 2) la cuenca del río San Juan que cubre partes de los estados norteros de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, hasta su desembocadura en el río Bravo en la frontera de México con los EE.UU. La concentración más alta de mercurio detectada fue de 11 ug/L; y 3) el sistema Lerma-Chapala-Santiago y la presa Alzate en el Estado de México. En esta cuenca se han detectado niveles de mercurio de hasta 0.0021 ug/L. Estudios más recientes de la Universidad de Guadalajara confirman la presencia en esta última región, de mercurio y metales pesados como cadmio y plomo.⁵⁻¹⁶

1.3 Normatividad

La percepción de los riesgos del mercurio no ha sido muy amplia en México, y aún no se han desarrollado normas muy precisas en cuanto al manejo de productos específicos, sin embargo, hay elementos en las leyes que derivan de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, que permiten regular este contaminante (tabla 2).

Una de las normas mexicanas más importantes o más cercanas en cuanto a la contaminación de este tóxico metal, encontramos la NORMA Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Ésta establece un límite de 23 ppm de mercurio en uso agrícola.¹⁷

Tabla 2. Normatividad del mercurio en México.

Ley	Reglamento	Normas Oficiales Mexicanas	Entidad Responsable
Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)	Reglamento de Residuos Peligrosos.	NOM-052-SEMARNAT-2005 NOM-053-SEMARNAT-1993	SEMARNAT, INE, PROFEPA
Ley de Aguas Nacionales	Reglamento de Aguas Nacionales.	NOM-031-SEMARNAT-1993 NOM-071-SEMARNAT-1994	SEMARNAT, INE, PROFEPA
Ley General de Salud	Reglamento para el Control Sanitario de las Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios.	NOM-071-SEMARNAT-1994 NOM-118-SSA1-1994	SSA
Ley Federal del Trabajo	Reglamento de Seguridad, Higiene y Medio Ambiente del Trabajo.	NOM-010-STPS-1994	STPS
Ley Federal de Sanidad Animal		NOM-016-ZOO-1994	SAGAR
Ley de Caminos, Puentes y Autotransporte Federal	Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos.	NOM-002-SCT2/1994	STC
Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos	Reglamento de Armas de Fuego y Explosivos.	No existe un reglamento oficial mexicano. Sin embargo, el Art. 41 indica que el fulminato de mercurio está sujeto a los reglamentos de la Secretaría de la Defensa Nacional.	SEDENA

Ley de Industrias Mineras	Reglamento para las Actividades Mineras.	No existe un reglamento oficial mexicano. Sin embargo, el Art. 41 indica que el fulminato de mercurio está sujeto a los reglamentos de la Secretaría de la Defensa Nacional.	SECOFI
---------------------------	--	--	--------

De las leyes y los reglamentos, se derivan las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), que son de aplicación federal y son redactadas con la participación de los diferentes sectores de gobierno, academia e industria y sometidas a consulta pública antes de su publicación definitiva; hasta la fecha se han publicado las normas listadas en la Tabla 3.

La entidad encargada de vigilar el cumplimiento de estas normas, es la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) y cuenta con las oficinas generales en la Ciudad de México y representaciones en cada estado de la República Mexicana.¹⁶

Tabla 3. Normas Oficiales Mexicanas para regular el uso del mercurio.

Norma	Tipo de Reglamento
NOM-052-SEMARNAT-2005.	Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de residuos peligrosos.
NOM-053-SEMARNAT-1993.	Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
NOM-001-SEMARNAT1996.	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
NOM-002-SEMARNAT-1996.	Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
NOM-004-SEMARNAT-2002.	Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.
NOM-117-SSA1-1994.	Bienes y servicios. Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica.
NOM-048-SSA1-1993.	Que establece el método normalizado para la evaluación de riesgos a la salud como consecuencia de agentes ambientales.
NOM-016-ZOO-1994.	Análisis de mercurio en hígado, músculo y riñón de bovinos, equinos, porcinos, ovinos y aves, por espectrometría de absorción atómica.
NOM-010-STPS-1994.	Relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se produzcan, almacenen o manejen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el medio ambiente laboral.
NOM-002-SCT2/1994.	Listado de las sustancias y materiales peligrosos más usualmente transportados.

Como puede observarse en la tabla 4, existen países con una legislación más estricta para los sitios contaminados con mercurio que en México.

Tabla 4. Límites permisibles internacionales de mercurio para uso de suelo.¹⁸

País	Uso residencial (mg/kg)	Uso agrícola (mg/kg)	Uso industrial (mg/kg)
Alemania	0.25-0.5	-	-
Canadá	2	0.8	10
Reino unido	1.5	1	-
Suiza	0.8	-	-
México	23	23	310
New york	20	-	-

2 MÉTODOS DE REMEDIACIÓN

El término “tecnología de tratamiento” implica cualquier operación unitaria o serie de operaciones unitarias que altera la composición de una sustancia peligrosa o contaminante a través de acciones químicas, físicas o biológicas de manera que reduzcan la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado. Las tecnologías de remediación representan una alternativa a la disposición en tierra de desechos peligrosos que no han sido tratados, y sus capacidades o posibilidades de éxito, bajo las condiciones específicas de un sitio, pueden variar ampliamente. El uso de una tecnología de remediación en particular depende, además de los factores específicos del sitio y de las propiedades fisicoquímicas del contaminante, de su disponibilidad, de la fiabilidad demostrada o proyectada, de su estado de desarrollo (laboratorio, escala piloto o gran escala) y de su costo.

Las técnicas tradicionales de remediación del suelo contaminado con metales pesados generalmente involucran prácticas convencionales de ingeniería civil, aplicadas individualmente o en grupo. En estos procesos físicos, químicos y térmicos principalmente se requiere remover físicamente el suelo del sitio contaminado o bien minimizar el riesgo de exposición.

- A. Contención, incluye a las técnicas denominadas de cobertura, barreras verticales y barreras horizontales. Al aplicar estos procesos el material contaminado se mantiene en su lugar, de manera que no entra en contacto con personas ni con el medio ambiente.
- B. Solidificación y estabilización, son procesos en los que se mezclan o inyectan agentes de tratamiento al material contaminado para obtener residuos sólidos, reducir la solubilidad del contaminante, disminuir el área de contaminación expuesta o limitar el contacto entre fluidos y contaminantes. En esta categoría se incluyen técnicas como mezcla de cemento, encapsulación con polímeros y vitrificación.

Las técnicas de remediación antes mencionadas tienen un alto costo, elevado consumo de energía, destrucción del sitio contaminado y problemas de logística. Debido a las limitaciones que presentan las tecnologías tradicionales de remediación surge la necesidad de utilizar técnicas alternas como la biorremediación.¹⁹⁻²⁰

La elaboración de un plan de saneamiento precisa una cierta de limitación del resultado mínimo a alcanzar.

Se dividen en dos tipos de tratamiento y/o recuperación de suelos en dos grandes grupos:

Tratamiento IN SITU y tratamiento EX SITU.

Las técnicas in situ son de menor costo, de bajo impacto ambiental inducido pero existen muchas dudas sobre los resultados finales. Las técnicas ex situ se destacan por su efectividad, dado que el suelo contaminado es físicamente eliminado y el suelo nuevo que se incorpora se homogeniza con el anterior no contaminado, pudiendo controlarse mejor el proceso. El sistema se opera prescindiendo de los factores externos como el clima. Estas técnicas tienen el problema del alto costo.³⁻²¹

2.1 REMEDIACIÓN IN SITU

Son las aplicaciones en las que el suelo contaminado es tratado, o bien, los contaminantes son removidos del suelo contaminado, sin necesidad de excavar el sitio. Es decir, se realizan en el mismo sitio en donde se encuentra la contaminación.

2.1.1 Biodegradación in situ

Persigue la transformación de sustancias potencialmente peligrosas en productos inocuos por activación de los procesos biológicos naturales o mediante microorganismos específicos para cada contaminante. Ventajas: Los contaminantes generalmente son destruidos y que se requiere un mínimo o ningún tratamiento posterior. Desventajas: Resulta caro hacer crecer bacterias para usarlas para atrapar metales; en este sentido, los intercambiadores iónicos son más baratos y realizan el mismo trabajo, es necesario verificar la toxicidad de intermediarios y/o productos y no pueden emplearse si el tipo de suelo no favorece el crecimiento microbiano.

2.1.2 Vitrificación

La vitrificación es un proceso donde el suelo y los contaminantes se funden en una matriz vítrea mediante la creación de un campo eléctrico entre dos electrodos enterrados. La resistencia del terreno al paso de la corriente genera temperaturas suficientes para fundir el suelo. Los componentes no volátiles se integran en la matriz vítrea, mientras que los constituyentes orgánicos son destruidos en un proceso parecido a la pirólisis. Ventajas: Es posible utilizar suelos contaminados como material básico para la fabricación de vidrio (vitrificación), puede servir para formar un producto útil (material de relleno para caminos), es una tecnología totalmente desarrollada y disponible comercialmente, reduce la movilidad de los contaminantes inorgánicos (principalmente Hg, Pb, Cd, As, Ba, Cr y cianuros) y la destrucción de los contaminantes orgánicos por reacciones de oxidación y/o pirolisis. Desventajas: El material solidificado no puede ser utilizado como suelo nuevamente y puede impedir el futuro uso del sitio, altos costos, los COVs tienden a volatilizarse durante el mezclado del suelo con los agentes de solidificación/estabilización, y generalmente éstos no son inmovilizados; la profundidad a la que se encuentre el contaminante limita algunos procesos; el material solidificado puede impedir el futuro uso del sitio; los metales volátiles (Pb, Cd, As, Hg) pueden volatilizarse durante el tratamiento; no es recomendable para sitios con más de 25% de metales.

2.1.3 Degradación química

Consiste en la adición de una sustancia química para inducir la degradación química. Los factores que controlan la eficacia del sistema son: el tipo de contaminante, las características del suelo para la permeabilidad para la inyección de aditivo, arenas o materiales no finos para facilitar su mezclado en situ, la presencia de obstáculos subterráneos que impidan el mezclado superficial, profundidad de la contaminación del suelo y la posible generación de contaminantes más tóxicos que los originales (como la oxidación de mercurio y cromo). Ventajas: Es una tecnología de corto a mediano plazo. Desventajas: Puede ocurrir una oxidación incompleta o formación de compuestos intermediarios, dependiendo del contaminante y el agente oxidante usado; la presencia de aceites y grasas disminuye la eficiencia; los costos se incrementan para altas concentraciones de contaminantes.

2.1.4 Estabilización / solidificación

Consiste en mezclar el suelo contaminado con un medio de fijación conformando una masa endurecida y poco permeable en la que se inmovilizan los contaminantes. Puede realizarse in situ o en suelos extraídos. Los factores que controlan la eficacia de estos tratamientos son: el tipo de suelo y distribución del tamaño de las partículas, el alto contenido en materia orgánica, aceites y grasas en cantidades superiores al 1%, el uso potencial de materiales estabilizantes / solidificantes, la aceptación legislativa, el impacto generable a largo plazo, así como la presencia de cromo, mercurio, plomo, plata u otras sustancias transformables por oxidación en formas más tóxicas y/o móviles. Ventajas y desventajas: son las mismas que se señalan en los procesos de la vitrificación.

2.1.5 Lavado del suelo

Consiste en la adición de agua, por inyección superficial o sub-superficial con un aditivo químico que favorezca la disolubilidad de los contaminantes movilizándose éstos en el medio de extracción. El líquido resultante es recogido mediante sistemas de drenajes o por pozos de bombeo, pudiendo en algunos casos recuperarse los aditivos empleados. La eficacia estará determinada por la presencia de otros contaminantes no considerados, de la variabilidad de las concentraciones en el espacio y del conocimiento de la dinámica de flujo de la mezcla de lavado. Ventajas: Bajos costos, no requiere de infraestructura sofisticada y efectivo para suelos arenosos o muy permeables. Desventajas: Se requiere excavar y manipular el suelo, no es eficiente para mezclas complejas, los contaminantes deben ser solubles y se necesitan procesos secundarios para tratar aguas residuales y partículas finas de suelo.

2.1.6 Aireación del suelo

Este es un método de extracción basado en el movimiento de los vapores a través del suelo mediante una diferencia de presión generadas por bombeo de aire desde el

exterior que tras circular a través del espacio contaminado, es evacuado por el pozo de extracción para su liberación o tratamiento.

Ventajas: Se trata de una técnica de muy amplias posibilidades dadas sus características de facilidad de instalación y operación, bajos costes y mínimo impacto. Desventajas: Los factores clave a considerar e la aplicación de esta técnica son las propiedades fisicoquímicas del contaminante (presión de vapor, solubilidad, densidad,...) las características del suelo y las condiciones particulares del lugar de vertido.²⁰

2.2 REMEDIACIÓN EX SITU

La realización de este tipo de tecnologías, requiere de excavación, dragado o cualquier otro proceso para remover el suelo contaminado antes de su tratamiento que puede realizarse en el mismo sitio (*on site*) o fuera de él (*off site*).

2.2.1 Tratamientos químicos

Consiste en tratamientos similares a los de degradación química in situ, pero en este caso presentan mejores eficiencias de tratamiento al homogenizarse el suelo con el reactivo controlándose el proceso.

2.2.2 Degradación biológica (compostaje)

Este sistema de tratamiento persigue la transformación de contaminantes altamente tóxicos en sustancias asimilables por la naturaleza mediante procesos metabólicos de microorganismos específicos para los diferentes tipos de contaminación. El suelo contaminado se extiende en capas finas para optimizar la admisión de oxígeno (*landfarming*), o se emplean sistemas más sofisticados que implican un control de parámetros como humedad, temperatura y contenido de oxígeno (compostaje). Para la efectiva metabolización de los contaminantes se requiere que estos sean susceptibles de su biodegradación, aerobia o anaeróbicamente y unas instalaciones que posibiliten controlar las condiciones del suelo (contenido en humedad, permeabilidad, temperatura, nutrientes, pH,...), Ventajas: Se obtienen buenos resultados con suelos arenosos, arcillosos y turbosos. Desventajas: Debe existir un control y medidas de seguridad para evitar una potencial migración de los contaminantes hacia aguas subterráneas y una posible emisión aérea.

2.2.3 Extracción o lavado de suelos

Es un sistema de tratamiento en el que se trasladan los contaminantes del suelo a un líquido, movilizándose así los contaminantes absorbidos en las partículas de suelo. Los factores a considerar para la utilización de este sistema de tratamiento son: las características de los contaminantes, las características del suelo, la cantidad de suelo a tratar, las variaciones en la concentración del contaminante, el uso previsto para el suelo tratado y el tratamiento y la eliminación de las aguas residuales.

2.2.4 Depósito de seguridad

Este tratamiento consiste en la consideración del suelo contaminado como un residuo tóxico y peligroso con destino en vertedero de seguridad. Ventajas: El confinamiento de los residuos en un ambiente subterráneo seguro, previsto de algún tipo de sistema de impermeabilización y de sistemas de recolección de lixiviados y escorrentías superficiales. Desventajas: Este método depende del tipo de contaminante (problemas con sustancias reactivas, corrosivas, etc., que cambian a lo largo del tiempo) disponibilidad de emplazamiento adecuado, diseño del sistema de impermeabilización y aceptación pública y administrativa.²⁰

2.2.5 Desorción térmica

Se trata de un tratamiento térmico *ex situ* en el que se somete al suelo a unas temperaturas más bajas que en la incineración (90-320°C, desorción térmica de baja temperatura; 320-560°C, desorción térmica de alta temperatura) para conseguir la desorción en vez de la destrucción de los contaminantes que persigue la incineración. Ventajas: durante la desorción térmica de baja temperatura, el suelo retiene sus propiedades físicas y sus componentes orgánicos, lo que hace posible que pueda conservar su capacidad para soportar futura actividad biológica. Desventajas: Las temperaturas empleadas están elegidas para volatilizar contaminantes orgánicos pero no para oxidarlos.



Figura 5. Desorción térmica.

2.3 REMEDIACIÓN EN MÉXICO

En el mercado ambiental de nuestro país, actualmente existen una gran cantidad de empresas que ofrece diferentes tipos de tecnologías para la remediación de sitios contaminados. Sin embargo, no fue hasta 1997, que las autoridades ambientales establecieron un programa de verificación y certificación de estas empresas. Actualmente para poder realizar un trabajo de remediación es necesario contar con permisos específicos, como la licencia ambiental única (LAU). Esta disposición oficial, ha permitido un mayor control acerca de las tecnologías que se ofrecen para remediar suelos y de las posibilidades reales de éxito que estas permiten.

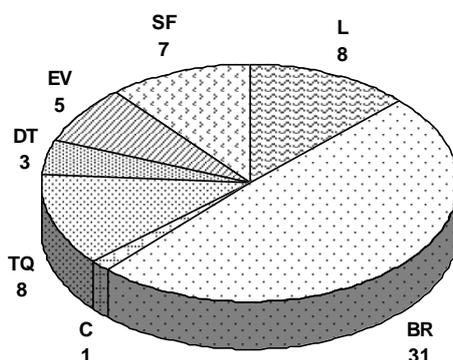


Figura 6. Tecnologías de remediación de suelos utilizadas en México por empresas autorizadas. BR: biorremediación; L: lavado de suelos; SF: separación física; EV: Aireación del suelo; DT: desorción térmica; TQ: tratamiento químico; C: centrifugación ^{SEMARNAT, 2002}

De acuerdo con datos proporcionados por la SEMARNAT, todas las tecnologías que ofrecen las empresas que cuentan con permisos para remediar suelos contaminados, están enfocadas exclusivamente a la remediación de sitios contaminados con compuestos orgánicos. De un total de 57 empresas autorizadas, no se tienen datos de alguna que ofrezca servicios para la restauración de suelos contaminados con metales. Dentro de los contaminantes tratados, principalmente se encuentran los hidrocarburos, lodos aceitosos, lodos de perforación y recortes de perforación.³⁻²¹

De acuerdo con datos proporcionados por 40 empresas autorizadas para remediar suelos contaminados con diferentes tipos de contaminantes, la mayoría utilizan métodos biológicos (biorremediación) para el tratamiento¹¹. El lavado de suelos, la oxidación química y la separación física constituyen otra parte importante de las tecnologías más empleadas en México (Figura 2).

Un ejemplo más detallado lo podemos encontrar en Zacatecas, con datos obtenidos por la PROFEPA. En diciembre de 1996, en la Laguna la Zacatecana con una extensión aproximada de 120 hectáreas y a escasos 10 Km de la ciudad de Zacatecas, existen 4 plantas (Jales de Zacatecas, S.A. de C.V., Beneficiadora de Jales de Zacatecas, S.A. de C.V., Jales del Centro, S.A. de C.V. y Mercurio del Bordo, S.A. de C.V.), que benefician jales por el proceso de lixiviación con hiposulfito de sodio y que se encuentran aguas abajo de la presa en cuestión. La separación de los valores (oro, plata como productos y mercurio como subproducto, principalmente) se realiza mediante un proceso térmico, en el cual se condensa el mercurio. Estas haciendas que laboraron por 300 años hasta principios del presente siglo, tiraban los desechos en los cauces de los arroyos, los cuales fueron arrastrados hacia los valles por las lluvias, formando en estos depósitos muy importantes. En el caso de la presa del Pedernalillo, se acumularon 5 millones de toneladas de materia mineralizada, conteniendo un promedio de 60 g de plata y 180 g de mercurio por tonelada, lo que equivale aproximadamente a un total de 300 toneladas de plata y 900 toneladas de mercurio.¹⁶

El Dr. Arturo Aguirre Gómez, especialista en Química Ambiental, es un investigador de la Facultad de Estudios Superiores (FES) Cuautitlán, que tiene gran interés junto con un grupo de personas en el análisis para cultivar en forma exitosa, algunas plantas ya sea tradicionalmente o con modificación genética para extraer metales pesados en grandes cantidades y así descontaminar suelos en México, ya sea en corto o mediano plazo.²³

2.4 REMEDIACIÓN EN EL MUNDO

La contaminación peligrosa del mercurio es preocupación de muchos países, es por esto que se busca remediar el enorme problema que se ha causado en tantos años por distintas fuentes, en busca de una o varias soluciones encontramos organizaciones preocupadas por minimizar la polución de este peligroso metal, países que investigan nuevas opciones más eficientes, investigaciones con una mezcla de varios métodos en los que encontramos un porcentaje mayor de descontaminación, o el uso de métodos novedosos como la ingeniería genética que mejora los métodos ya conocidos.

Como ejemplos tenemos un grupo internacional llamado Zeromercury de más de 75 organizaciones no gubernamentales de interés público de todo el mundo creada en el 2005 por el European Environmental Bureau/ Oficina europea de medio ambiente y el Mercury Policy Project/ Ban mercury Working Group. El objetivo del grupo es reducir continuamente las emisiones de mercurio de todas las fuentes controlables, con visión a eliminar el mercurio del medio ambiente de la UE y de todo el mundo.²²

La ingeniería genética trata de suplir la ausencia de plantas hiperacumuladoras de elevada biomasa, bien transfiriendo rasgos de hiperacumulación a plantas de elevada producción de biomasa, o bien incrementando la biomasa en hiperacumuladoras naturales mediante técnicas de mutagénesis convencional.

Algunas de estas plantas (las descontaminadoras de productos con mercurio) poseen un gen bacteriano modificado de la reductasa, merA, son capaces de convertir el Hg (II) tomado por las raíces en Hg (0) mucho menos tóxico y volátil que se elimina a la atmósfera. Otro tipo de plantas usan el gen merB de la liasa, modificado de bacterias y puede convertir el metilmercurio tomado por las raíces de la planta en sulfhidril mercurio (II) limitante. Las plantas que expresan ambos genes son capaces de convertir el mercurio y el metilmercurio iónicos en mercurio elemental volátil.

En una reciente publicación de Japón, se muestran investigaciones de una tecnología para el tratamiento de ambientes contaminados con mercurio en suelos y aguas residuales, con uso de bacterias con transformaciones genéticas y biocatalizadores que son enzimas usadas en plantas de tabaco para que sean capaces de acumular específicamente mercurio de los sitios contaminados sin la liberación del vapor de hg.²⁴

Debido al riesgo que corren algunos habitantes de Venezuela por la contaminación del mercurio científicos venezolanos crearon una estrategia que permite la rehabilitación de los suelos contaminados, que posee una efectividad del 98% en la eliminación del mercurio.

Esta estrategia utiliza plantas de vetiver y árnica, microorganismos y también un horno rehabilitador de suelos diseñado en la investigación.²⁵

3 FITORREMEDIACIÓN

La fitorremediación es una técnica de biorremediación que emplea plantas para degradar, extraer, contener o inmovilizar los contaminantes del suelo y agua. Las plantas son seleccionadas de acuerdo a su habilidad para tratar con los contaminantes y por su adaptabilidad a otros factores específicos del sitio, tales como el clima, la profundidad de sus raíces y su facilidad de desarrollarse en el tipo de suelo.

Es importante mencionar que este método es útil cuando se tiene el contaminante en una concentración máximo promedio de 3000 ppm o 3000 mg por kg de suelo, ya que un valor mayor requería de otra técnica más adecuada.

El tipo de contaminantes que manejan este método van desde combustibles (gasolina, diesel, turbocina), armas químicas, pesticidas, herbicidas, residuos industriales, sustancias para tratamiento de maderas, hasta los explosivos, muchas de estas sustancias, han demostrado su alta toxicidad (carcinogénicos) para el ser humano y los seres vivos que conviven con él.

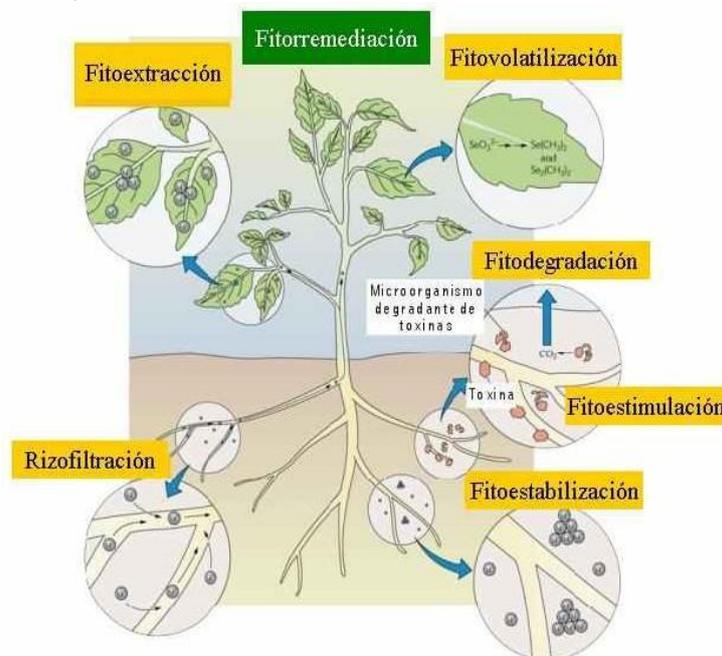
3.1 TIPOS DE FITORREMEDIACIÓN

- **Fitoextracción:**
El proceso de fitoextracción usa plantas para la absorción, concentración y precipitación de metales pesados presentes en el suelo. Los metales se acumulan en el tejido de las plantas donde es permanentemente almacenado. Las plantas llamadas hiperacumuladoras son las adecuadas para este tipo de trabajos de fitorremediación ya que pueden absorber 100 veces más metales que otras plantas. Después de que estas plantas son utilizadas para procesos de remediación, la biomasa debe de ser tratada para la recuperación de los metales absorbidos, en el caso que sean recuperables; o darles confinamiento adecuado.
- **Fitodegradación:**
El uso de las plantas y microorganismos asociados para degradar sustancias nocivas.
- **Rizofiltración :**
El uso de las raíces de las plantas para absorber y adsorber principalmente metales pesados en mantos acuíferos. Estos metales se estabilizan en las raíces de la planta. El cadmio y el plomo son los metales que mayormente son removidos por este mecanismo.
- **Fitoestabilización:**
Las plantas son utilizadas para estabilizar los metales reduciendo la erosión por aire y agua. Además, la movilidad de contaminantes se ve reducida ya sea por la

concentración en los tejidos de raíces, por ser adsorbida en las raíces o por precipitar en la zona donde se localizan éstas. Secreciones en la rizosfera hacen precipitar metales y son ligados a partículas sólidas en la matriz del suelo. Las plantas de igual manera deshidratan esta matriz reduciendo el volumen a ser tratado de manera confinada, como se recomienda para los desechos peligrosos como los que contienen metales pesados. Este proceso sirve muy bien para inmovilizar y descontaminar de los suelos arsénico, cadmio y plomo.

- **Fitovolatilización:**
Es utilizada para extraer metales volátiles del suelo, como el mercurio, de los sedimentos y suelos, los cuales son emitidos a la atmósfera a través de la respiración de las plantas como vapor destoxificado.⁶

Figura 7. Tipos de fitorremediación.



3.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Ventajas

- Es una tecnología limpia que usa energía solar.
- Las plantas son usadas como bioreactores, operando en condiciones no estériles.
- Irrupción ambiental mínima, el tratamiento in situ preserva la capa superior del suelo y evita la excavación.
- Es útil ante una gran variedad de contaminantes ambientales.
- De bajo costo, hasta un 60-80% menos que los métodos tradicionales de remediación.
- No requiere de equipo costoso o personal altamente especializado.

- Fácil de instaurar.
- Es posible su aplicación a gran escala.⁶

Desventajas

- Sólo es útil para sitios con un nivel de contaminación medio, moderado o bajo.
- Se requiere de mucho tiempo para restaurar un sitio.
- Su aplicación se encuentra limitada por las condiciones de tipo geológico, edáficas y climáticas particulares del sitio contaminado.
- Las plantas absorben metales tóxicos pueden ser de gran riesgo para la vida silvestre al introducir dichas sustancias en la cadena trófica.
- El uso de especies invasivas, no nativas puede afectar la biodiversidad.
- La biomasa cosechada que concentra los contaminantes puede ser clasificada como material peligroso, por lo tanto, debe haber especial cuidado en el manejo y disposición del mismo.⁶

3.3 PLANTAS ACUMULADORAS DE MERCURIO

Metalofitas

Las metalofitas son especies de plantas que han desarrollado los mecanismos fisiológicos para resistir, tolerar y sobrevivir en suelos con altos niveles de metales y, por ello, son endémicas de suelos con afloramientos naturales de minerales metálicos.

Estas rarezas botánicas tienen muy difícil su supervivencia, por una parte, por su especialización para sobrevivir en entornos contaminados con unos minerales concretos, y por otra, por su restringida supervivencia en zonas no mineralizadas. Además, el propio desarrollo de la minería de la zona afecta y puede eliminar la vegetación nativa durante el desarrollo continuado de la actividad, y por la deposición de materiales y residuos en la superficie del entorno. En este caso estaremos perdiendo la biodiversidad de unas especies que han tardado cientos, miles o millones de años en desarrollar mecanismos para sobrevivir en suelos metalíferos.

Todas las plantas poseen un potencial para absorber una amplia variedad de metales del suelo pero la mayor parte de las plantas tienden solamente a absorber los que son esenciales para su supervivencia y desarrollo. Existe una notable excepción de esta regla de un pequeño grupo de plantas que pueden tolerar, absorber y translocar altos niveles de ciertos metales, estas plantas reciben el nombre de hiperacumuladoras.²⁶

Una definición propone que si una planta contiene más de 0.1% de Ni, Co, Cu, Cr y Pb o 0.1% del Zn en sus hojas sobre una base del peso seco, ésta puede ser llamada una “hiperacumuladora”, independientemente de la concentración del metal en el suelo.²⁷

Cada especie vegetal presenta unas características propias que van a determinar su interacción con el suelo y su capacidad de supervivencia en unas determinadas condiciones ambientales.

Las siguientes plantas son propuestas de investigaciones tanto nacionales como internacionales, se desea obtener una planta con estudios previos, la cual es importante, se acerque más a las necesidades del lugar elegido.

La producción de biomasa de una especie vegetal es uno de los puntos clave en la evaluación de la transferencia suelo-planta del elemento tóxico. El potencial fitoextractor de un vegetal no sólo depende de su capacidad fijadora del metal pesado relativo a su masa, sino también a la cantidad de biomasa que es capaz de producir durante su vida, así como al ritmo al que lo hace. En general, las plantas hortícolas o herbáceas son de crecimiento más rápido que las especies arbustivas o arbóreas, aunque éstas últimas pueden alcanzar valores elevados de biomasa.

Salvia rhyacophila (chia). Se trata de una planta herbácea de la familia de las lamaicas, junto con el lino. Hierba anual de 40-70 cm, tallos vellosos; lámina de la hoja ampliamente ovalada, 5-7 cm de largo. Además dice que es una de las especies vegetales con la mayor concentración de ácido graso alfa, linolénico omega 3. Nativa de México. Las plantas se adaptan a una amplia variedad de suelos, climas y precipitaciones mínimas. En previas investigaciones se da a conocer una acumulación de mercurio de $81.8 \pm 6.96 \text{ mg Kg}^{-1}$ y debido a la falta de investigación más profunda se propone como método de fitoestabilización.⁶

Cecropia peltata (yarumo). Es un árbol representativo de la zona intertropical americana y se extiende desde México hasta América del Sur, incluyendo las Antillas. Es común en clima cálido, aunque puede llegar a crecer a alturas de más de 2.000 metros en las laderas montañosas, en zonas conocidas como selva nublada, bosque nuboso, bosques caducifolios, siempre verdes y morichales. Está incluido en la lista 100 de las especies exóticas invasoras más dañinas del mundo. Es de crecimiento rápido, sus raíces son superficiales y su vida es corta. Es un árbol típico de la vegetación pionera, crece en los rastrojos, por lo que es ideal para proyectos de reforestación. Puede crecer en cualquier parte, incluyendo las paredes y pilares de cemento de los puentes y otras construcciones. Se propone como fitoextracción debido a la capacidad de acumulación en estudios previos de aproximadamente 2019.3 ng/g .

Brassica juncea. Su nombre común es mostaza parda, mostaza oriental, mostaza de la China, mostaza india. Debido a su gran tamaño (llega a crecer hasta alturas de 1,5 m) y por la fácil cosecha, la mostaza parda ha desplazado a la mostaza negra (*Brassica nigra*) como planta de explotación agraria. Prefieren un suelo húmedo y con sol.

Esta planta se utiliza para quitar los metales pesados del suelo en sitios de los desechos peligrosos porque tiene una tolerancia más alta para estas sustancias y almacena los metales pesados en sus células. La planta después se cosecha y se dispone correctamente. También previene la erosión del suelo de estos sitios que previenen la contaminación adicional.²⁸

Polypogon monspeliensis (vernáculos de flecos de lana, mijo silvestre o cola de zorro). Es una planta anual de la familia de las gramíneas con unas inflorescencias (panículas) constituidas por una multitud densa de minúsculas espiguillas provistas de aristas finas y cilios que dan al conjunto un aspecto de cola de zorro y un tacto de peluche. Crece en herbazales húmedos y en orillas de arroyos, donde tolera bien las aguas eutróficas.

Marrubium vulgare (marrubio), que es una fanerógama de la familia de las Lamiaceae, nativa de Europa, norte de África, y Asia.

Es una herbácea de hojas grisáceas, perenne, una planta que dura más de 1 año, y mide de 30 a 90 cm de altura, se parece en algo a menta en su apariencia. Esta planta, de hojas ásperas, de gusto amargo, pero no desagradable, tiene un olor que se asemeja algo al de las manzanas. Su raíz es fusiforme de la que sale una corona de raíces secundarias, blanca y crece a una profundidad de 30 a 40 cm.

Se ha usado tradicionalmente en infusión como remedio para todo tipo de enfermedades derivadas del frío, en general es expectorante y fluidificante, útil tanto para vías respiratorias superiores, como bronquitis, tos, catarro o asma.

Su tipo de suelo es la tierra franca, se da en pleno sol, en clima mediterráneo, con un pH de neutro a ácido, requiere de poca materia orgánica, resiste heladas de hasta -5°C, resistente a la sequía, por tanto el riego puede ser bastante espaciado; se da en suelo seco y florece desde mediados de primavera hasta mediados de otoño. Requiere mínimos cuidados para su cultivo. Bastará con ubicarla en un sitio a pleno sol y en una zona con climas cálidos y de montaña. Se puede adaptar con facilidad a cualquier tipo de suelo, siempre y cuando cuente con un buen sistema de drenaje.

Se sugiere al mismo tiempo su uso para la fitorremediación conforme a un artículo científico.¹⁻²

Rumex Induratus. Hierba perenne de base lignificada, polígama. Tallos de hasta 80 cm, profusamente ramificados. Hojas con peciolo de hasta 9 cm y limbo de hasta 5 cm, hastado, con lóbulo central anchamente lanceolado u ovado. Flores en racimos espiciformes terminales y axilares muy laxos. Periantio con piezas externas de 1,5-2 mm, reflejas. Valvas de 4,5-9,5 mm, ovadas a suborbiculares, cordadas, marcadamente nervadas, más largas que los aquenios.

Endemismo Ibérico-Magrebí. Vive en áreas pedregosas y taludes. Florece y fructifica desde la primavera y hasta el otoño.¹⁻²

Solanaceae Nicotiana glauca. Es una planta que crece de manera natural en clima semidesértico, bajo condiciones adversas para otras plantas (bajo contenido de materia orgánica y alto contenido de metales a niveles fitotóxicos), es de rápido crecimiento y propagación; además de presentar buena absorción de antimonio en raíz y de arsénico, mercurio y cinc en hoja.

Presenta una elevada toxicidad debido a la presencia de una sustancia denominada anabasina, que se suma a otros componentes como la nicotina, piperidina, normicotina, nocotoina, pirrolidina, etc...²⁹

Vetiveria zizanioides (Vetiver). Es una planta perenne de la familia de las gramíneas, nativa de la India. El nombre de Vetiver es originario del idioma tamil. Se encuentran registros en la literatura tamil de usos del Vetiver con propósitos medicinales.

El Vetiver puede crecer hasta 1,5 metros, sus tallos son altos, las hojas son largas, delgadas y rígidas. A diferencia de la mayoría de las gramíneas, las raíces del vetiver crecen de manera vertical y alcanzan una profundidad de hasta 4 metros.

Muchos aspectos del vetiver lo convierten en un excelente método para controlar la erosión. A diferencia de muchas gramíneas, las raíces del vetiver crecen exclusivamente de manera vertical, alcanzando hasta los 4 metros de longitud. Esto lo convierte en un excelente estabilizador de bordes y terrazas. La cercanía con la que crecen las macollas, unas de otras, ayuda a bloquear el paso de agua.³⁰

3.4 DETERMINACIÓN DEL ÁREA CONTAMINADA

Por medios públicos nos damos cuenta de la contaminación de mercurio en muchos lugares del mundo, por tanto, México no se queda atrás por ser gran productor de plata y oro, y teniendo yacimientos importantes de mercurio.

Hemos dado con los puntos más contaminados de México debido a formas antropogénicas de obtener mejor economía. Encontramos entre los más contaminados la Presa Alzate Estado de México, San Joaquín en Sierra gorda Querétaro, Taxco guerrero, la zacatecana en Zacatecas, Hidalgo, Guanajuato, etc. Entre estos el más oportuno a visitar fue Taxco guerrero ya que aparte de ser el menos estudiado cuenta con más cercanía para facilitar la investigación. Sin embargo, surgieron dificultades que sobresalen de nuestras manos. Se sabe que este tipo de lugares con gran turismo hacen que se dificulten estudios y análisis en esta materia ya que gran parte de su economía se basa en la visita de personas de otros estados y países.

Se realizó la visita a las haciendas de Taxco para tener información más completa sobre los sitios contaminados, y nos encontramos con otro punto menos a nuestro favor y se descubrió lo complicado del manejo de la situación en cuanto a la contaminación de las

minas del lugar. Encontrar las minas en este rumbo es un tanto complicado porque existen problemas de otra índole que dificultaron la recolección de materiales para el estudio.^{INE}

No obstante se cuenta con estudios previos de los suelos del estado de Zacatecas.¹⁸

Zacatecas

El estado de Zacatecas tiene una extensión territorial de 75,040 km², esto representa el 3.83% del territorio nacional. El estado se encuentra en la meseta central de México, entre la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental.

Localidad “La Zacatecana” que se encuentra en el municipio de Guadalupe.

Se encuentra aproximadamente a 10km al oriente de la ciudad de Zacatecas, con las coordenadas:

Latitud norte 22°44’50”

Longitud Oeste 102°28’10”

El ejido alberga a la presa El pedernalillo, también conocida como la Zacatecana, ya que toma el nombre de la comunidad. En la presa La Zacatecana, desde la época colonial, se acumularon depósitos de jales procedentes de un gran número de viejas minas en Zacatecas lo que provoca que durante varios siglos, las tierras de La Zacatecana sean objeto de una contaminación creciente; con mercurio, arsénico, flúor, plomo y otros contaminantes, mismos que representan riesgos a la salud de la población; el agua de la laguna es utilizada principalmente para el riego de cultivo.

Cuenta con una superficie de 2 536 ha y una Temperatura media anual de 16°C; precipitación pluvial máxima de 900 mm y mínima de 324 mm.

Yacimientos minerales

La explotación de los ricos yacimientos minerales se realizó desde el Siglo XVI, extrayendo principalmente la plata y oro, contenidas geológicamente en las zonas de oxidación de los depósitos minerales. Por tal motivo, la metalurgia que se empleaba para la separación del oro y plata, requería de mercurio. Esta tecnología se utilizó aún en las dos terceras partes del Siglo XX.

La minería en la región hasta antes de los años setenta, no fue de grandes volúmenes de extracción, las capacidades de las minas no rebasaban las 100 t/día, por el método de amalgamación. Lo trascendental, fue que durante esos 400 años, los productos de los jales, terreros y el intemperismo de las rocas, se depositaron en el Valle de Guadalupe, concentrándose los materiales aluviales a partir de 1938 en la presa La Zacatecana.

Edafología

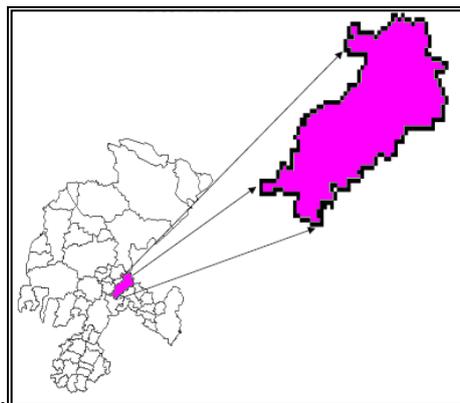


Figura 8. Municipio de Guadalupe-INE

El suelo en la región, principalmente en su más cercana comunidad, la de Zóquite, se caracteriza por ser de migajón arcilloso limoso arenoso, xerosol cálcico y regosol calcárico. Sus coloraciones varían en diferentes tonalidades, que van de rojizo oscuro a café claro. Las profundidades oscilan entre 0.50 a 1.50 metros, además describen buen drenaje interior.

En el ejido de La Zacatecana, se reporta la siguiente descripción del suelo: arcilloso arenosos; estructura granular; consistencia suave, color castaño rojizo a grisáceo, drenaje interno bueno, pedregosidad de 0 a 10 %, sin rocosidad, con pH de 7.0 a 8.0.

Vegetación

Originalmente estuvo caracterizada por matorral crasicáule y por matorral desértico micrófilo y en menor proporción matorral desértico rosetófilo, pastizal natural y vegetación halófila.

Actualmente la mayor parte de dicha vegetación ha sido reemplazada por cultivos agrícolas.

La vegetación nativa actualmente está formada por nopal duraznillo, nopal cardón, álamo, sauce, mezquite, huizache, matorral inerme y zonas con pastizal abierto.

Fauna

Se han podido identificar 19 especies de aves acuáticas migratorias, 4 especies de aves rapaces, 21 aves terrestres, 6 especies de reptiles y 6 especies de mamíferos.

Entre otras se ha observado la presencia del ganso del canada (*Branta canadensis*), aguililla (*Buteo jamaicensis*), cerceta café (*Anas acuta*), cascabel colanegra (*Crotalus molossus*) y zorra (*Urocyon cinereoargenteus*) Esta laguna se caracteriza por recibir en invierno una gran variedad de aves acuáticas migratorias destacando su importancia como lugar de paso y descanso para especies que siguen las rutas del Pacífico, Centro y Golfo de México, entre las especies más importantes se encuentran: pato golondrino y ganso canadiense.²¹

3.5 ELECCIÓN DE LA PLANTA

Una de las características más importantes para elegir una planta que será utilizada para fitorremediación, es que sea tolerante al metal (en este caso al mercurio), que sea nativa de México para poder encontrarla con facilidad y no tener problemas de biodiversidad, tomar en cuenta los riesgos de toxicidad natural que puedan afectar el medio, que se dé en la mayoría del año, entre otros. Es complicado encontrar la planta adecuada, así que de varias opciones, teniendo información en la literatura de varias plantas, se obtienen las más cercanas a nuestras necesidades.

Vetiveria zizanioides (Vetiver), *Marrubium vulgare* (marrubio) y *Cecropia peltata* (yarumo).

Son tres plantas que podemos encontrar en México y que tienen capacidad de absorción de metales pesados de acuerdo con estudios previos encontrados en la literatura.

Estas tres plantas a pesar de ser acumuladoras de mercurio nos enfrentamos a uno de los principales problemas que es la naturaleza del lugar en donde se encuentra la contaminación, debido a esto y a la facilidad con la que se distribuyen nuestras plantas, se eligió al **marrubio**, el cual presenta mayor facilidad de distribución, gran resistencia y crecimiento en distintos ambientes con menor preocupación en el cultivo, aparte de tener en cuenta que crece durante todo el año.



Figura 9. Yarumo y vetiver.

4 MÉTODO

4.1 PLAN DE TRABAJO

Dado que México ha sido un país minero desde tiempos prehispánicos, esta actividad ha generado zonas geográficas de alta contaminación de mercurio; para tratar de resolver este problema, se propone la siguiente estrategia o plan de trabajo de fitorremediación.

Cada sitio contaminado requiere un tratamiento, es un nuevo reto y único ya que cada lugar depende de características fundamentales, muchas de estas en función de las condiciones específicas del mismo, en las cuales debemos buscar una solución que sea la más efectiva teniendo en cuenta costos para tener buenos resultados al final del trabajo.

Así que tomaremos ciertas consideraciones generales que nos ayuden a establecer el paquete de fitorremediación óptimo.

Después de revisar, estudiar y analizar datos obtenidos de la literatura, se procede a iniciar la conjunción del paquete a partir de los siguientes puntos:

- El trabajo por realizar requiere de un equipo conformado por personal calificado del estudio, como la botánica, la agronomía, ingeniería, contabilidad, estadística, toxicología, salud, ecología, etc.; por tanto es necesario contar con personal calificado para la simplicidad del paquete de fitorremediación.
- Como segundo punto es necesario realizar visitas a los lugares donde se necesita descontaminar, se debe conocer el tipo de contaminante y sus características físicas y químicas con las cuales sabremos si el sitio debe ser remediado y la manera en la cual debe tratarse, aparte de determinar su toxicidad. También es de suma importancia verificar que sea un área adecuada para realizar los cultivos, sin dejar atrás los análisis previos e información conocida acerca de los contaminantes presentes, su cuantificación y datos que se puedan obtener de dicho lugar. A parte de la ubicación geográfica, debemos obtener las características del sitio, así como su uso de suelo (industrial, residencial o agrícola).
- Es básico conocer el máximo permisible del contaminante elemental que encontramos en normas nacionales e internacionales con la cual minimizaremos los daños a la salud y al medio ambiente.

- Como cuarto punto y de acuerdo a las normas nacionales de estudios de suelo se toman muestras para ser estudiadas por los especialistas correspondientes y así determinar la cantidad de contaminantes del área en estudio. Así mismo, se obtienen los siguientes datos: Detallar características del contaminante, las reacciones que se llevan a cabo, la cuantificación de mercurio en el suelo a descontaminar, la profundidad del contaminante en suelos, la distribución a través del sitio, entre otros puntos.
- Ya estimada la cantidad de contaminante en los suelos a remediar, se prosigue con la identificación, análisis y selección entre alternativas de plantas con estudios previos a nivel laboratorio o invernadero para tener una opción óptima de fitorremediación, sin dejar atrás las pruebas de campo con la planta elegida.
- Se realiza la planeación del método para una mayor eficiencia en la implementación, en el cual se calcula el tiempo estimado del proceso y los costos que se requieran durante el trabajo, incluyendo la cantidad de equipo y las herramientas para un control previo y aproximado de costos; al mismo tiempo debe anexarse el tratamiento de los residuos que se generen en el caso de ser necesario, como ejemplo tenemos la fitoextracción.
- Como seguridad se requiere de un plan de emergencia en caso de alguna situación fuera de control o complicaciones que pudiesen presentarse en el tiempo del trabajo.

4.1.1 Detalles del plan de trabajo (estudios preliminares)

4.1.1.1 Personal de trabajo

Debemos adaptar las funciones y responsabilidades de los miembros que conforman al grupo de trabajo.

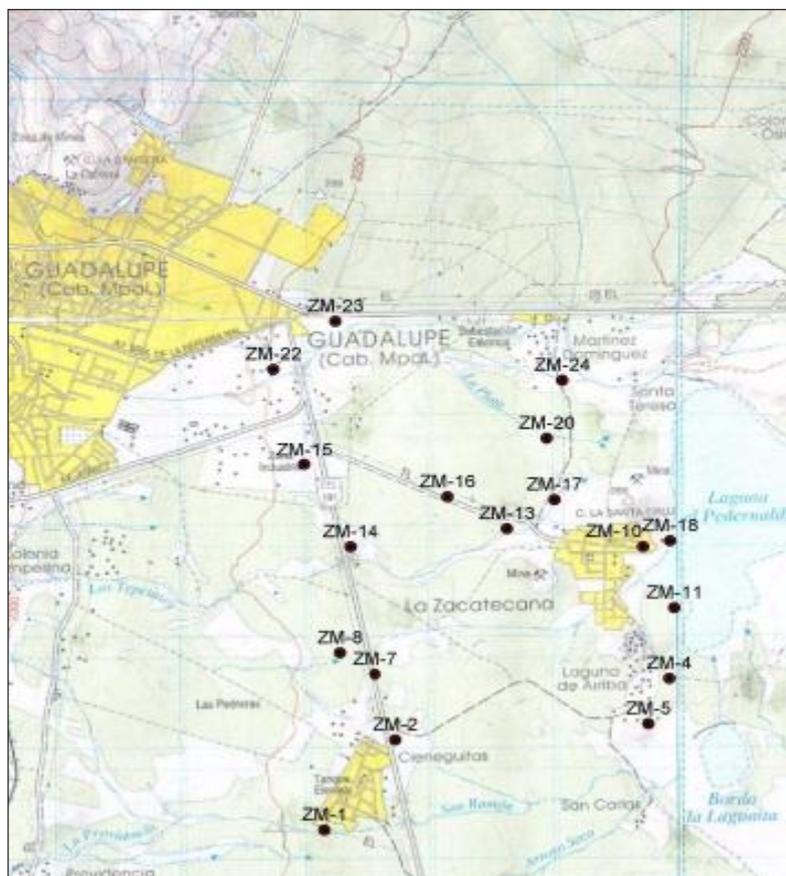
4.1.1.2 Verificación del lugar

La región minera de la Zacatecana en el estado de Zacatecas, cuenta con una población de 2,525 habitantes con yacimientos metálicos de oro, plata, zinc, cobre y plomo.

El autor de la tesis de doctorado del tema “Estudio de especiación de mercurio en suelos contaminados por residuos de amalgamación en México”¹⁸, lleva a cabo un muestreo de suelos en un área de 16 km² en esta comunidad, en estudios previos se muestran altos

índices de contaminación por Hg. Se ubica geográficamente la zona de estudio y su extensión; se señala en mapas topográficos a escala de 1:50,000. ¹⁸

Figura 10. Mapa de muestras en la comunidad “La Zacatecana”. ¹⁸



La Zacatecana es una zona de perfil predominante rural. Con el paso del tiempo las tierras contaminadas en esta zona se han utilizado en labores de agricultura, ganadería y desarrollo urbano principalmente. Los principales cultivos son de frijol, maíz, avena, entre otros, la actividad pecuaria es dirigida a la crianza y reproducción de ganado bovino, ovino y caprino. Las plantas en esta zona son usadas además para forrajeo de ganado, el cual podría estar ingiriendo partículas del suelo depositadas en las superficies de las mismas; no dejando atrás el peligro de la inhalación en el ambiente del mercurio por los habitantes.

Estudio epidemiológico en zacatecas:

Por medio de la PROFEPA, IMSS, INE, ISSSTE y la Universidad Autónoma de Zacatecas, en el 2002 en la Zacatecana, se realizó un estudio epidemiológico; fueron considerados datos generales, siendo una investigación de manifestaciones reumáticas, datos clínicos

de intoxicación por mercurio y datos de intoxicación aguda, los cuales fueron valorados por un médico especialista perteneciente al centro de la Sociedad Mexicana de Reumatología, A.C. quien estuvo presente durante la toma de las muestras y efectuando la encuesta clínica. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5. Datos clínicos reportados en una población expuesta a metales pesados como mercurio.

Manifestación clínica	Frecuencia	Porcentaje
Inflamación articular	11	8.6
Dolor Articular	34	47.9
Rigidez Matinal	23	16.4
Caída de pelo	42	30.0
Edema de manos	23	16.4
Convulsiones	11	7.9
Dolor de pecho	38	27.1
Dedos pálidos o fríos	19	13.6
Total	201	20

En conclusión se este estudio, verificaron que el 23.7 % de los encuestados tuvieron datos clínicos de intoxicación por mercurio.

4.1.1.3 Objetivo meta

Reducir el contaminante, en este caso el mercurio de suelos de la zacatecana por medio de la fitorremediación de acuerdo a la NORMA Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, ésta establece un límite de 23 ppm de mercurio en uso agrícola.¹⁷

4.1.1.4 Estudios del suelo

La matriz del suelo está formada por cinco componentes principales: minerales, aire, agua, materia orgánica y organismos vivos. Los materiales minerales son los principales componentes estructurales y constituyen más del 50% del volumen total del suelo. El aire y el agua juntos ocupan el volumen de los espacios, y usualmente conforman de 25% a 50% del volumen total. La proporción relativa de aire/agua fluctúa considerablemente con

el contenido de humedad del suelo. El material orgánico ocupa entre 3% y 6% del volumen promedio, mientras que los organismos vivos constituyen menos del 1%.

Todos estos factores definen el tipo de suelo, que junto con las condiciones particulares de un sitio frecuentemente pueden limitar la selección de un proceso de tratamiento en particular. Por otra parte, la posibilidad de usar una tecnología de tratamiento, puede eliminarse con base en la clasificación del suelo u otras características propias de éste.

Entre las más importantes están las siguientes:

Tamaño de partícula. Los suelos se clasifican en función de su tamaño de partícula, siendo sus tres principales componentes las arcillas (< 0.002 mm), los sedimentos ($0.002 - 0.05$ mm) y las arenas ($0.05 - 2.0$ mm). Es importante considerar esta propiedad, ya que la relación área/volumen de los diferentes tipos de partícula, tienen un impacto directo sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y por consiguiente en las tecnologías de remediación.

Heterogeneidad. Un suelo demasiado heterogéneo puede impedir el uso de tecnologías *in situ* que dependan del flujo de un fluido. Pueden crearse canales indeseables de fluidos en las capas arenosas y arcillosas, dando como resultado tratamientos inconsistentes.

Densidad aparente. Es el peso del suelo por unidad de volumen, incluyendo agua y espacios. Es importante considerar que el suelo está compuesto por sólidos y espacios llenos de agua y/o aire, y que su densidad dependerá de su humedad.

Permeabilidad. Se refiere a la facilidad o dificultad con la que un líquido puede fluir a través de un medio permeable. La permeabilidad de un suelo es uno de los factores que controla la efectividad de tecnologías *in situ*. En general, una baja permeabilidad en el suelo disminuye la efectividad de la mayoría de las tecnologías de remediación.

pH. El pH determina el grado de adsorción de iones por las partículas del suelo, afectando así su solubilidad, movilidad, disponibilidad y formas iónicas de un contaminante y otros constituyentes del suelo. La solubilidad de muchos contaminantes inorgánicos cambia en función del pH y normalmente su movilidad disminuye con altos valores de pH.

Humedad. La humedad del sitio a tratar es un factor importante para la elección de una tecnología en particular. Una alta humedad puede impedir el movimiento de aire a través del suelo, lo que afecta los procesos de biorremediación, así como provocar problemas durante la excavación y transporte, además de aumentar costos durante el uso de métodos de remediación térmicos.

Materia orgánica. La fracción orgánica de los suelos está constituida por desechos vegetales y animales, que generalmente se le conoce como humus. Un suelo con alto

contenido húmico, disminuye la movilidad de los compuestos orgánicos y así la eficiencia de ciertas tecnologías (extracción de vapores, lavado de suelo).³⁻¹⁶⁻²¹

De acuerdo a los puntos anteriores se hace el estudio en los suelos con los especialistas que se requieren.

Muestreo en suelos de la Zacatecana

De acuerdo a investigaciones previas en los suelos de la Zacatecana en Zacatecas realizadas por Irma Cruz Gavilán en su tesis de doctorado¹⁸, tomó un muestreo total de 18 puntos para su estudio de acuerdo a la norma **NMX-AA-132-SCFI-2006**.

Esta norma mexicana establece las especificaciones técnicas para la obtención y el manejo de muestras, que permitan la caracterización de suelos en el sitio de estudio, a través de la identificación y cuantificación de metales y metaloides, entendiendo por éstos el arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y vanadio.³¹

En dicha tesis, la muestra del suelo la realizan superficialmente, ya que esta parte está compuesta de polvos removidos por vientos y es la que es inhalada por las personas que viven en zonas cercanas a los sitios estudiados. Por lo tanto el muestro se da simple de 0 a 15 cm de profundidad.

Análisis de concentración total de metales en muestras de suelo

Una vez finalizados los trabajos de muestreo, siguiendo la experimentación de la tesis de Irma, procede con el análisis de la concentración total de mercurio. Adicionalmente, cuantifica la concentración total de plata y plomo, ya que estos metales están asociados a la presencia de mercurio en los residuos de amalgamación de oro y plata.

Previo al análisis, las muestras son secadas al medio ambiente durante 48 horas, hasta presentar un contenido de humedad no mayor al 30%, estas las trituran en un mortero y las tamizan para tener un tamaño de partícula de 425 μm (malla 40, ASTM). Para cada muestra empleó una limpieza física con aire a presión y cepillado.

Posteriormente realizó la digestión de 10g de cada una de las muestras vía húmeda. Los análisis se realizaron por triplicado mediante la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica con Generador de Hidruros¹⁸

Tabla 6. Resultados de las muestras de Hg, PB y Ag en suelos de la Zacatecana.

Muestra (concentración promedio del triplicado)	Hg (mg/kg)	Pb(mg/kg)	Ag(mg/kg)
1	0.28±0.02	14.59±0.51	17.43±0.03
2	0.26±0.04	33.41±0.06	17.69±0.02
4	0.44±0.01	30.83±1.92	17.97±1.26
5	0.8±0.13	73.85±6.20	20.84±0.08
7	0.12±0.01	59.89±0.57	19.88±1.08
8	0.06±0.04	101.86±0.25	21.27±0.13
10	9.66±0.68	204.04±3.48	21.36±0.54
11	5.35±0.25	130.93±7.76	22.97±0.20
13	0.31±0.01	70.22±0.12	19.30±0.04
14	1.45±0.19	316.40±3.39	24.72±0.25
15	0.16±0.01	226.27±4.61	24.10±1.37
16	1.73±0.01	331.11±3.61	23.87±0.47
17	0.96±0.12	280.18±2.33	24.29±1.08
18	26.16±0.91	495.17±16.06	24.13±1.29
20	47.95±7.97	3,330.54±28.72	24.89±0.26
22	17.69±1.02	-	17.43±1.09
23	-	275.14±0.66	17.69±0.92
24	19.82±0.31	14.59±0.14	17.97±0.84

Mostrando parte de los resultados de la experimentación de la tesis de Irma en la tabla 6, se puede observar como las muestras 18 y 20 de Hg rebasan el límite máximo de normatividad permitida de 23mg/kg.

Esta misma norma es la que regula el plomo el cual no debe sobrepasar los 400mg/kg de plomo. Así mismo nos damos cuenta que las muestras 18 y 20 de Pb también rebasan el máximo permisible de esta norma.

Para el caso de la plata, no se excedió el límite de 390 mg/kg de Ag, lo establecido por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

4.1.1.5 Análisis de la planta

Entre varias especies de plantas fitorremediadoras de Hg, se eligió el marrubio ya que era la especie más cercana a las necesidades del lugar contaminado, en este caso una región de Zacatecas. Mercury accumulation and resistance to mercury estrés in *Rumex induratus* and *Marrubium vulgare* grown on perlite.

Figura 11. *Marrubium vulgare*



De la información de un artículo reciente sobre la acumulación y resistencia de mercurio en el marrubio que realizaron investigadores de la universidad de Madrid en España (Moreno, 2007),² mencionan que las estrategias de las plantas de la acumulación del metal, deben ser evaluadas bajo condiciones controladas en el laboratorio. Para esto, en la experimentación que menciona el artículo, se transfirieron plantas de Marrubio en macetas y crecieron durante dos meses en condiciones controladas con perlita como sustrato y tratadas con diferentes niveles de mercurio soluble en la solución nutritiva aplicada.

Es importante tener en cuenta que el mercurio puede ser secuestrado por los componentes del propio suelo, pero por otra parte también puede ser inmovilizado por los microorganismos edáficos o extraído por los sistemas radicales de las plantas y transferidos al interior de las mismas. La transferencia del mercurio a la planta a través de las raíces es muy lenta y no depende de la concentración del mercurio total presente, si no de la cantidad de mercurio fácilmente disponible.

Los metales pueden ser adsorbidos en perlita, por lo tanto, la perlita se ha utilizado para la eliminación de metales pesados de aguas residuales. Sin embargo, la perlita humedecida también se ha utilizado como sustrato para plantas, que permite un suministro controlado de metales pesados a la planta. Por lo tanto se debe determinar la acumulación de mercurio de plantas de estas especies bajo el control de suministro de Hg.

Los investigadores realizaron el experimento entre marzo y mayo en un invernadero de la Universidad Autónoma de Madrid (España) bajo las siguientes condiciones: 10°C - 28°C de temperatura y 60% -80% de humedad. Utilizan un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones para cada tratamiento. El tratamiento del mercurio fue de 0, 5, 10 y 50 µM, lo aplican al marrubio durante 2 meses. Cada planta la cultivan en una maceta de 20L, que contiene 2 L solución de nutrientes y 17 L (15 kg) de perlita como sustrato. La solución de nutrientes (pH ≈ 6,5) se renovó cada 9 días. Su composición fue la siguiente: 1.5 mM KNO₃, 1.5 mM Ca(NO₃)₂, 1 mM KH₂PO₄, 1 mM de MgSO₄, 0.75 mM de K₂SO₄, 53.76 µM Fe-EDDHA, 27.3 µM MnSO₄, 0.32 µM CuSO₄, 0.77 µM ZnSO₄, 46.25 µM H₃BO₃, 0.016 µM (NH₄)₆Mo₇O₂₄. El mercurio se lo añaden como sal HgCl₂.²

Determinación de mercurio en plantas de marrubio

En seguimiento del artículo, se cosechan las plantas después de que se agrega el mercurio en solución, después el marrubio cosechado es dividido en raíces, tallos y hojas. Posteriormente, se lava a fondo con agua de la llave y luego se enjuaga con agua destilada durante 2 min. Todo el material vegetal se pesa, el cual fue de 7 g secos a T <40°C para el análisis de minerales. El resto del material se congeló en N₂ líquido y lo almacenaron a -20 °C.

El contenido de agua se estimó a partir de plantas frescas y del peso seco.

Para la mineralización ácida de los órganos de la planta, añadieron 10 ml de agua de calidad Mili-Q®, 3 ml de HNO₃ y 2 mL de H₂O₂ a 0.5 g de producto de peso seco (DW) y se digiere en 1.5 kPa y 125°C en un autoclave. La solución se filtra y se diluye a 25 mL para medir el Hg y nutrientes por ICP-MS.²

La técnica de espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS, del nombre en inglés Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry), es una variante de las técnicas de análisis por espectrometría de masas. Las ventajas principales de esta técnica radican en la alta precisión, bajos límites de detección y bajo coste económico, analizando la mayoría de los elementos e isótopos presentes en la tabla periódica de manera simultánea en no más de un par de minutos.

Resultados de la determinación de mercurio en plantas de marrubio

Tabla 7. Resultados de Hg en el marrubio.²

Especie	Órgano	Control	5µM	10µM	50µM
Marrubium vulgare	µ g Hg (g DW) ⁻¹				
	Raíz	19.70±7.47	94.29±18.73	140.81±11.87	323.69±66.66
	Tallos	3.38±0.92	4.92±0.86	8.33±2.43	15.99±1.37
	Hojas	10.49±1.05	20.43±2.29	29.67±3.54	43.04±1.99
	Flores	0.85±1.01	2.31±1.09	3.04±1.25	4.91±1.38
Δ mg Hg planta ⁻¹					

	Contenido neto de Hg	0.07±0.02	0.92±0.06	1.19±0.10	1.24±0.12
--	----------------------	-----------	-----------	-----------	-----------

Los autores del artículo tomado,² reportan los resultados mostrados en la tabla 7 y concluyen los siguientes puntos:

El crecimiento de las plantas, el contenido de agua, la concentración de clorofila, y la traslocación de nutrientes fueron reducidas en ambas especies de plantas por el Hg.

La adición de Hg redujo la biomasa vegetal a elevadas concentraciones en disolución (50-100 mM)

Las concentraciones de mercurio en las flores, presentaron el mayor incremento relativo al aumentar el suministro de mercurio, a pesar de que fueron los órganos con las concentraciones más bajas de mercurio.

El mercurio almacenado en las raíces fue de 83% -93% del Hg total neto contenido.

El Hg se acumuló principalmente en raíz, aunque el incremento de la dosis de Hg aportada en disolución produjo un aumento de los niveles en raíz y hoja.

Un concepto importante a tener en cuenta es el denominado factor de transferencia o factor de bioacumulación (BAF), que expresa la relación entre la concentración del elemento en la planta y la concentración del elemento fácilmente disponible en el suelo. La existencia de niveles altos de mercurio fácilmente disponible en suelo, pueden resultar fitotóxicos, provocando efectos que pueden ir desde la muerte del ejemplar hasta efectos de carácter subletal (disminución del crecimiento, senescencia, disminución del contenido de clorofila, etc.^{EPA, 1997})

Este factor también mide la capacidad que tiene la planta de absorber el Hg de las fracciones que realmente tiene a su disposición (tabla8).

Tabla 8. Factor de Bioacumulación de Hg en el Marrubio, se tomó como referencia el Hg en el sustrato.

Especie	Condiciones de cultivo	Hg (µM)	BAF	
			(Hg)planta/(Hg)disponible	(Hg)planta/(Hg)total
Marrubio	Cultivado con perlita	5	525	48
		10	414	46
		50	458	37

El hecho de que la concentración de mercurio fácilmente disponible sea baja frente a la concentración de Hg_{total}, permite el desarrollo normal de la planta, sin mostrar síntomas de toxicidad frente al mercurio. Al mismo tiempo asegura que los procesos transporte de mercurio a las aguas superficiales y subterráneas sean muy reducidos, limitando de algún modo los riesgos sanitarios y medioambientales que ello conllevaría.

Tomando los datos de contaminación en suelos de la Zacatecana obtenidos de la tesis de doctorado de Irma¹⁸ que se muestran en la tabla 6, y los datos del artículo científico de concentración de mercurio en el marrubio de España² mostrados en la tabla 7, se procede a analizar, comparar y unir la información para obtener el porcentaje de remoción del mercurio en el terreno elegido de la Zacatecana.

4.1.1.6 Tiempo requerido para descontaminar

La fitoextracción es una tecnología de largo plazo, que puede requerir de varios ciclos de cultivo para reducir la concentración de los contaminantes a niveles aceptables. El tiempo requerido depende de varios factores: de la concentración y tipo de contaminante, tamaño y profundidad del área contaminada, tipo de suelo y condiciones presentes, de la duración del periodo de crecimiento y de la eficiencia de remoción por la especie utilizada y puede tomar entre uno y 20 años.³²

En este caso, debe de realizarse un análisis más detallado y la experimentación necesaria para obtener el tiempo más cercano al real, aunque podemos determinar una aproximación, de acuerdo al crecimiento del marrubio y de las investigaciones completas citadas en literatura, en laboratorio y en el campo.

Todo lo anterior se realiza en algunas universidades de México,²³ lo que hace factible llevar a cabo toda esta experimentación en el campo mexicano para proyectarlo a su aplicación futura y poder controlar este problema de contaminación tan serio en nuestro país.

4.1.1.7 Costos

Los costos necesarios para el desarrollo, diseño, implementación, monitoreo y operación de un sistema de fitorremediación, incluyen costos por semillas, fertilizantes, pesticidas; sistemas de irrigación; control de plagas; muestreo y análisis de plantas, suelo y microorganismos; tratamientos de residuos de las plantas.

Debido a que los costos de crecimiento de un cultivo son mínimos comparados con los de la remoción del suelo y su sustitución, el uso de plantas para remediar suelos contaminados con metales es muy promisorio. Los costos de la fitoextracción dependen de las condiciones específicas del sitio y pueden variar entre 15 y 48 USD/m³. Se estima que la fitorremediación de un suelo contaminado con Pb (50 cm de profundidad) puede costar alrededor de 5 USD/m³.³⁶

Otros ejemplos de ahorro en comparación con otras técnicas se muestran en las siguientes tablas (9-10):

Tabla 9. Ahorro de costos estimados a través de fitorremediación en lugar de un tratamiento convencional conforme la EPA. (1 acre=4 046.8564 m²)³³

Contaminante y área	Fitorremediación		Tratamiento convencional		Ahorros
	Aplicación	Costo estimado	Aplicación	Costo estimado	
Plomo en el suelo (1 acre)	Extracción, cosecha y eliminación	\$ 150,000-250,000	Excavación y relleno sanitario	\$500,000	50-65%
Solventes en agua subterránea (2.5 acres)	Degradación y control hidráulico	\$200,000 Por instalación y mantenimiento inicial	Bombeo y tratamiento	\$700,000 Costos operativos anuales	50% costos ahorrados en el 3er año
Hidrocarburos en suelos (1 acre)	Degradación in situ	\$50,000-100,000	Excavación y relleno sanitario o incineración	\$500,000	80%

Tabla 10. Ventajas de los costos de fitorremediación de suelos usando raíces de hierbas, comparado con otras técnicas.³³

Tipo de tratamiento	Rango de costos (\$/ton)
Fitorremediación	10-35
Biorremediación in situ	50-150
Ventilación de suelos	20-220
Tratamiento térmico indirecto	120-300
Lavado de suelos	80-200
Solidificación-estabilización	240-340
Extracción de solventes	360-440
Incineración	200-1500

4.1.1.8 Seguridad en la implementación

En general la fitorremediación presenta bajos riesgos de implementación excepto cuando se trata de cerca el tóxico contaminante, por esta razón debemos analizar el límite en la concentración a partir del cual se pone en peligro la salud pública, para que ninguna persona que esté trabajando cerca del contaminante peligre por intoxicación, por tanto se requiere de equipo especial, y un reglamento para trabajar en cada punto.

Cantidades pequeñas de mercurio metálico pueden levantar concentraciones en el aire a niveles que pueden perjudicar la salud; así que una vez que se presenten los síntomas de problemas de salud relacionados con el envenenamiento del mercurio metálico, se debe estar pendiente.

El cuerpo se deshace del mercurio mediante la orina y las heces fecales. La eliminación de esta sustancia del cuerpo puede tomar hasta varios meses después de la exposición.

La concentración máxima permisible de Hg ambiental en los lugares de trabajo es de 25 mcg/m³ (0,025 mg/m³). Se considera aceptable una concentración en el agua de 0,001 mg/L y una ingesta semanal tolerable de 5 mcg/Kg de Hg total y 3,3 mcg/Kg de metilmercurio

En caso de tener síntomas de intoxicación de mercurio, es importante alejar a la persona del lugar donde se encuentra el contaminante y recurrir al médico con rapidez.^{EPA}

4.1.1.9 Implementación a mayor escala

Ya teniendo el método, información y medidas necesarias para llevar a cabo el funcionamiento del sistema de fitorremediación y analizando como buena opción este tipo de tratamiento en suelos, se procede a realizarlo en gran escala. Por tanto en los siguientes puntos se muestra lo que debemos tener en cuenta para operar la tecnología de fitorremediación en campo:

- a. Se prepara el terreno a tratar. Ya delimitado el lugar, se limpia la superficie removiendo obstrucciones para poder aplicar los fertilizantes correspondientes, materia orgánica, etc.; estos materiales deben mezclarse uniformemente con el suelo de manera que no queden capas que impidan el movimiento del agua. También se deben incluir los sistemas de irrigación y cercar para minimizar riesgos.³⁵
- b. Antecedentes de la siembra. Se deben de tener estudios preliminares antes de la siembra para saber si se utilizarán semillas o plántulas en el área contaminada además de proponer las técnicas para llevarlo a cabo.
- c. Seguridad y salud. Es importante tener planes de emergencia, contar con equipos de protección, seguridad personal y normatividad del manejo de residuos peligrosos.
- d. Área restringida. Por seguridad de todas las personas, el área de trabajo debe ser restringida, para poder prevenir cualquier daño que puedan causar a las plantas y al medio ambiente.

Se debe tener vigilancia sobre el terreno de trabajo ya que es importante para poder optimizar el proceso de fitorremediación y tener opción de prevenir y disminuir cualquier peligro ecológico. En este punto es importante observar el crecimiento de las plantas, ya que afectan directamente la velocidad de remediación.

Como todo proceso, se debe dar mantenimiento a los sistemas de fitorremediación ya que requieren de operaciones de conservación de las condiciones del suelo, mantenimiento de los sistemas de irrigación, mantenimiento de las plantas, de la cerca. Si es necesario volver a plantar las especies o adicionar agentes quelantes.

4.2 DETERMINACIÓN DE UNA POBLACIÓN DE PLANTAS

Para la propagación de plantas se requiere del conocimiento de la estructura y la forma del desarrollo de la planta (ciencia de la propagación). El propagador debe tener parte de esa información de manera empírica trabajando con las plantas seleccionadas, pero si es posible, lo anterior debe ser complementado con cursos formales de estudio de botánica, horticultura, genética y fisiología vegetales.³⁵ En particular de la especie acumuladora del metal.

La cantidad de semilla por unidad de superficie es crítica en las siembras directas a fin de obtener la densidad de plantas deseada. Si la densidad final de plantas es demasiado baja, los rendimientos se reducirán debido a que el número de plantas por área unitaria es bajo. Si es demasiado alta, el tamaño y la calidad de las plantas adultas debe reducirse por competencia entre plantas por el espacio disponible, la luz solar, agua y nutrientes.³⁵

Para saber la cantidad de plantas de marrubio que se propone para plantar, es necesario conocer el área determinada, que en este caso se hizo el análisis en un área de 16 km² para el muestreo de suelos en la región de la Zacatecana en la tesis doctoral de Irma¹⁸, recordando que solo dos puntos son los que resultaron afectados los cuales son los que no respetaron el máximo permisible de 23 ppm (*figura 4*). Aunque cabe mencionar que esta área también está contaminada con plomo y en la literatura se mencionan experimentos en los cuales se muestra que el marrubio también presenta una buena absorción de plomo, entonces es recomendable usar el sistema en el área donde se observa la mayor contaminación de estos dos metales. Los dos puntos que resultaron contaminados con Hg, son los mismos que tienen un alto nivel de Pb.

Del área de 16 km², se retoman 4 km² para la implementación de este sistema, debido a la localización de los puntos 18 y 20 que son los más contaminados de las 18 muestras tomadas (*figura 4*).

Para obtener una población óptima de plantas, se propone una siembra en forma cuadrículada con la técnica de arado, tomando una distancia de 3 m² entre cada planta,

por lo tanto, los 4 km² que son 400 ha, son las que se toman en cuenta para la zona de plantación.

Utilizando la siguiente ecuación se obtendrá el número aproximado de una población de plantas y con este dato, los kilogramos necesarios de semillas:

$$\text{Densidad de una población de plantas} = \frac{\text{área en m}^2 \text{ a plantar}}{(\text{distancia entre plantas} * \text{distancia ente líneas})} \dots (1)$$

4.3 ESTIMACIÓN DEL TIEMPO PARA DISMINUIR LA CONTAMINACIÓN DEL MERCURIO

Se estima a partir del ciclo de vida de la planta, la época de cosecha y de la capacidad acumuladora de Hg de la planta.

El marrubio florece en mayo, extendiéndose hasta bien entrado el verano. La cosecha debe hacerse sobre la época de floración, se sabe que empieza desde mediados de la primavera hasta mediados del otoño, entonces se deberían cosechar en el mes de octubre.

En lo que respecta a la acumulación de Hg en esta planta, sabemos que el marrubio es resistente a desarrollarse en un ambiente contaminado con este metal y el nivel de toxicidad en los suelos de la Zacatecana donde se realizaron estudios¹⁸, es relativamente bajo lo cual hace factible la utilización de éste método de fitorremediación en este caso.

4.4 TRATAMIENTO DE RESIDUOS

La primera medida que se debe considerar siempre es si es posible generar menos residuos o aprovecharlos en otros procesos de fabricación.

Con la tecnología actual sería posible reducir el impacto negativo de cualquier contaminante a prácticamente cero. Pero hacerlo así en todos los casos sería tan caro que paralizaría otras posibles actividades. Por eso, en la gestión de los residuos tóxicos se busca tratarlos y/o almacenarlos de forma que no resulten peligrosos, dentro de un costo económico proporcionado. Esto se consigue con diversos procedimientos, dependiendo de cuál sea el tipo de residuo.

En este caso, tras la cosecha, los restos vegetales con mercurio son incinerados y posteriormente las cenizas pueden ser tratadas de distintas formas, una de ellas es reciclarlas de una forma poco costosa por medio de un proceso químico, el Hg puede ser recuperado y purificado por medio de condensadores y destilación a vacío; lo que constituye una estrategia relativamente económica para la limpieza de suelos contaminados. Ya teniendo el mercurio con una pureza aproximada al 98%, éste puede ser comercializado.⁴²

Otra de las posibles soluciones para el tratamiento del mercurio al finalizar la cosecha e incineración, es obtener el mercurio recuperado por el mismo proceso químico para posteriormente poder estabilizarlo, técnica que reduce químicamente el riesgo potencial de un residuo mediante la conversión de los contaminantes en formas menos solubles, móviles o tóxicas. La estabilización consiste en transformar el mercurio líquido en sulfuro de mercurio (HgS), la forma más insoluble y más común en la naturaleza. Se mezcla el Hg con azufre elemental en un reactor sellado con agitación continua y enfriado con agua, ya que la reacción presente es altamente exotérmica y espontánea a temperatura ambiente.

Finalizando la estabilización se procede al almacenamiento a largo plazo ya sea sobre tierra o a una gran profundidad. También es posible almacenarlo como mercurio líquido pero se requieren criterios específicos para una seguridad certera, como ejemplo, la pureza debe ser mayor al 99% para evitar impurezas, porque pueden aumentar fuertemente su solubilidad.

En Suecia, la única eliminación aceptable del mercurio consiste en el almacenamiento definitivo de los desechos, previamente tratados, a grandes profundidades, pero algunos aspectos técnicos de este método aún no se han resuelto.

Aunque el concepto de almacenamiento de mercurio aún no ha sido regulado por ninguna legislación y se requiere una investigación profunda para la evaluación de los sitios, es una opción para todos los países, en Europa ya existe una variedad de opciones y algunas ya son explotadas para el almacenamiento de residuos.

La mejor solución para algunos países puede ser la exportación para un sitio de almacenamiento, sin cubrir costos de tratamiento ni almacenamiento; solo que se requieren de acuerdos bilaterales de cooperación con países que disponen de instalaciones seguras para el almacenamiento de mercurio y para la aprobación de las exportaciones.

Otro modo de tratamiento después de cosechar e incinerar la planta, es la posibilidad de disponer en disolución acuosa de los cationes de metales pesados contenidos en la ceniza y por intercambio iónico convertirse en toba zeolítica. El material zeolítico resultante puede secarse y usarse para producir cementos mezclados que tienen una fuerza compresiva optimizada y que también disminuyen la expansión producida por reacciones de alcalino-agregado.³⁴

Para disminuir la contaminación de mercurio en una forma más común, se procede a la incineración controlada y las cenizas se almacenan en vertederos especiales en lugares acondicionados, que consisten en una depresión del terreno natural o artificial en la que se vierten, compactan y recubren con tierra diariamente los residuos acumulados de Hg, al final de algunos procesos. Es una parte especialmente complicada, ya que los vertederos de seguridad deben garantizar la suficiente estabilidad para no seguir contaminando las aguas subterráneas y/o superficiales, sin emisiones de gases o salida de productos tóxicos y que las aguas de lluvia no puedan filtrarse en el vertido, pues al salir lo harían lixiviando contaminantes. En la práctica esto es muy difícil de realizar, aunque se han realizado progresos en el diseño de estos vertederos.⁴²

Proceso de tratamiento de mercurio:

Generalidades. Después de la incineración de las plantas, se cuenta con varias opciones para determinar la disposición final del mercurio. En este caso se eligió el proceso de recuperación y purificación de mercurio el cual lo reconoceremos en este caso como el más apto para su posterior almacenamiento.

Analizando procesos de purificación de mercurio e información de equipos adecuados para este tratamiento, se decidió construir un proceso que cuenta con 6 equipos para lograr los mínimos contaminantes posibles.

La planta de tratamiento de mercurio se propone para eliminar los residuos orgánicos y otros compuestos inorgánicos que se encuentren en las plantas cosechadas de la fitorremediación de suelos.

La eliminación de los desechos se efectuará por medio de un horno para incinerar las plantas, condensar el mercurio y posteriormente purificarlo con una destilación a vacío.

Descripción del proceso:

Tras cosechar las plantas se incineran en un horno rotatorio de 7 m de largo. La temperatura que alcanzan los gases dentro del horno es de 600°C para poder vaporizar el mercurio. La salida de gases se lleva a cabo en toda la sección del horno. Las escorias caen por el cenicero que dispone el horno, parte del mercurio se queda en las cenizas debido a la condensación de los gases que ocurre en la etapa de enfriamiento con la consecuente adsorción de este elemento a las cenizas volantes de fondo, principalmente en la fracción carbonácea. Por esto mismo las cenizas al salir del horno son almacenadas, de esta manera es factible extraer del horno las escorias en proceso continuo, circunstancia que favorece la marcha general del proceso y evita que la instalación deba pararse periódicamente.

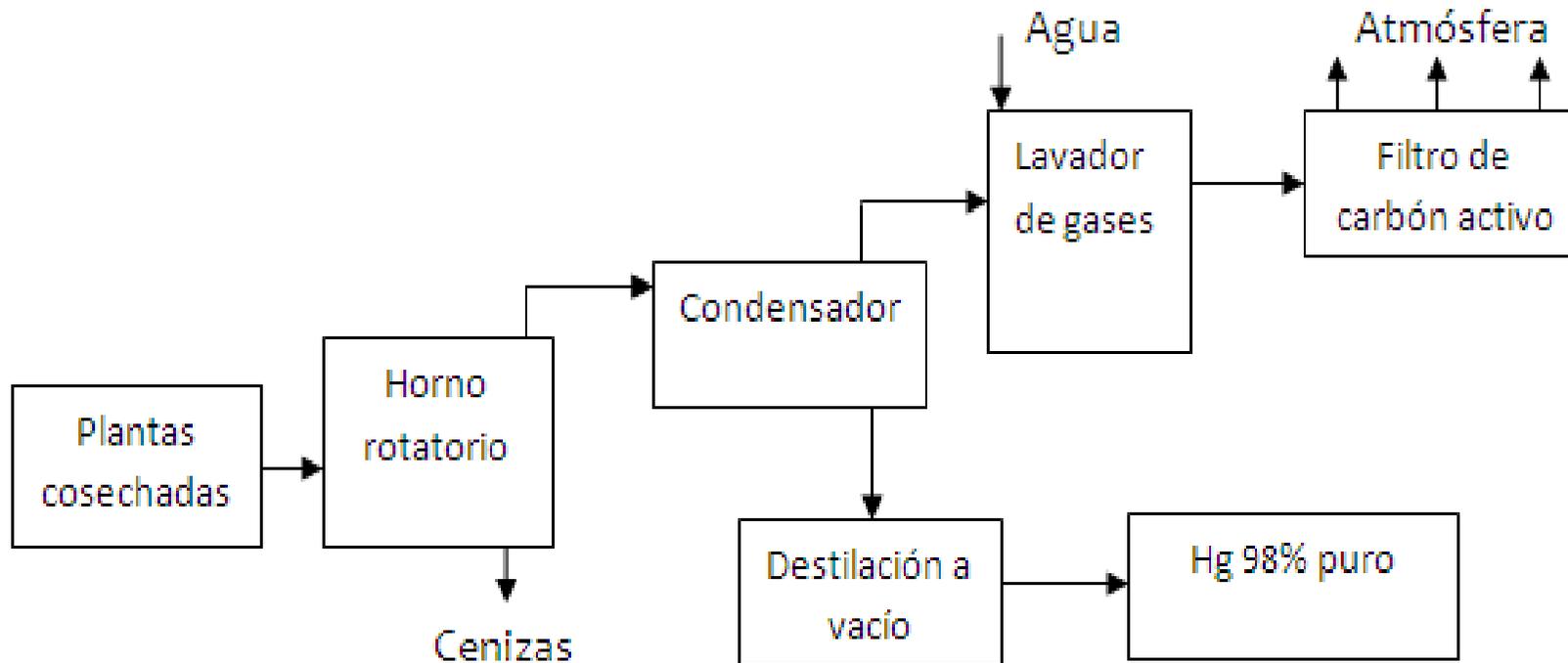
Los vapores que se forman en el horno salen por la línea 5 y se introducen en un tanque de condensación de carcasa y serpentín EA-400 enfriado por agua a temperatura ambiente, la cual a la salida del tanque es llevada hacia una torre de enfriamiento para obtener nuevamente 25°C. Del equipo de condensado se liberan por una tubería que se encuentra en la parte superior del tanque los gases incondensables por la línea 11 mediante la bomba GA-401, que pueden contener partículas de cenizas volantes, gases de combustión, agua y mercurio. Posteriormente pasa a través de un lavador de gases o scrubber acuoso DA-401 para quitar las partículas y gases ácidos (p.ej.: HCl, SO₂) por absorción de gases a través de una mezcla de agua con sosa al 30%, el agua utilizada con contaminantes menos tóxicos es reciclada en una depuradora. Los componentes ya neutralizados como el NaCl o el Na₂SO₄ se obtienen con una baja solubilidad.

Trazas de mercurio, gases de combustión y agua de proceso a la salida del scrubber corriente 12, pasan por un filtro de carbón activo FG-400 para eliminar componentes orgánicos antes de su emisión a la atmósfera. El efluente con contenido de metales pesados es almacenado en bolsones por la parte inferior del filtro a una temperatura de 160°C.

Por otra parte por la línea 6, se obtiene el condensado formado con un porcentaje considerable de mercurio a una temperatura de 260°C, este es alimentado para ser purificado en una torre de destilación a presión reducida DA-400, utilizando un sistema de vacío por eyectores que disminuyen la presión a 0.1 atm a una temperatura de 290°C, ya enfriado el mercurio en el intercambiador de calor EA-401, se recoge después del tanque colector y se trasfiere al área de llenado con una pureza de 98%.

A continuación se muestra el diagrama de bloques de proceso.

Esquema 1. Diagrama de bloques del proceso:



Descripción de equipos:

Horno rotatorio: Consiste en un cilindro de acero, recubierto en su interior por ladrillos refractarios, que se encuentran ligeramente inclinado respecto a la horizontal (menos de 10 grados) y que gira lentamente, a velocidades inferiores a 5 r.p.m.

El cilindro cuenta con llantas de acero que se apoyan sobre rodillos. Los rodillos soportan el peso del horno y su carga.

El calentamiento del horno se efectúa con gases calientes que se producen por combustión, en un quemador, de gas, fuel-oil, u otros combustibles. Habitualmente el quemador se ubica en el extremo más bajo. En la punta opuesta del horno se ubica la chimenea por donde se evacuan los gases del mismo.

Esto significa que el extremo inferior del horno, donde se ubica el quemador, es la zona más caliente. Los gases producidos van recorriendo el horno y entregando su calor, saliendo por el extremo opuesto.

El material a procesar es alimentado por el extremo superior del horno (lado de la chimenea), mediante dispositivos apropiados tales como roscas transportadoras, rampas, etc. A consecuencia de la inclinación y rotación del horno, el material se desplaza a lo largo del mismo hasta el extremo inferior (lado del quemador), donde sale a través de la boca de descarga. El material circula a contracorriente con respecto al calor.

Este tipo de horno es muy versátil y es apto para trabajar con materiales sólidos, fangosos e incluso líquidos. La función principal del horno es convertir los residuos sólidos, líquidos o pastosos a gases.

El ventilador general de tiro que contiene el horno, provoca una depresión en todo el sistema. El objetivo, aparte claro está de arrastrar los gases de combustión, en diverso:

1. Evitar que cualquier gas del proceso pueda salir al exterior.
2. Ayuda a enfriar las escorias y los materiales inertes que salen junto con ellas.
3. Mantiene la entrada del horno, la junta entre la puerta y el cilindro (horno rotativo), libre de posibles salidas de gases.

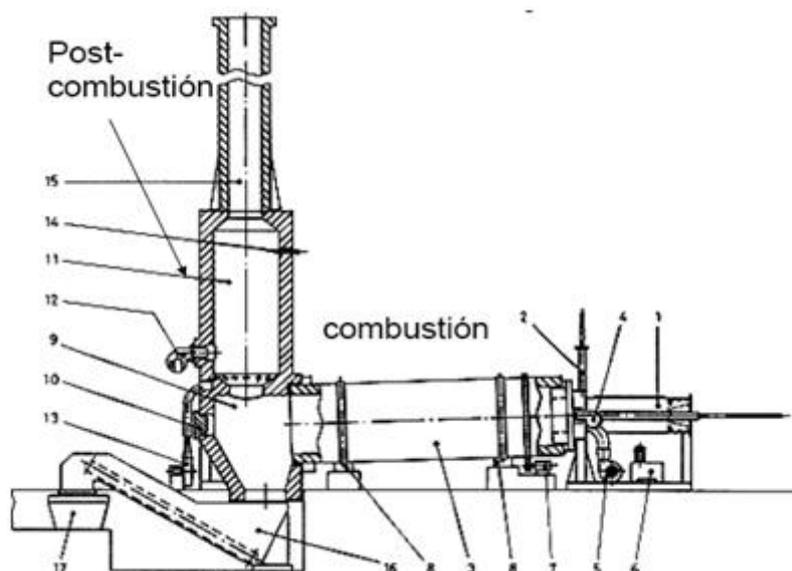


Figura 12. Horno rotatorio. 1. Cargador, 2. Puerta de banda, 3. Cámara rotatoria, 4. Encendido del quemador, 5. Ventilador de combustión, 6. Estación hidráulica, 7. Reductor de motor, 8. Rodillos, 9. Cámara de tránsito, 10. Puerta de inspección, 11. Postcombustión, 12. Quemador de postcombustión, 13. Ventilador de la postcombustión, 14. Indicador pirométrico, 15. Chimenea, 16. Zona de retiro de ceniza, 17. Contenedor de ceniza.

Condensador: Los condensadores de agua son diseñados para hacer que el agua al hacer contacto con su superficie le retire calor y así poder hacer que el refrigerante rechace calor y se condense.

El condensador de carcasa y serpentín, está construido de uno o más serpentines de tubos desnudos o con aletas, encerrados en una cubierta de acero soldada. El agua de condensación circula por el interior del serpentín mientras que el refrigerante gaseoso entra por la parte superior de la cubierta, y al ponerse en contacto con los serpentines, le cede el calor y se condensa. El refrigerante líquido cae al fondo de la cubierta que hace de receptor.

El agua de condensación se utiliza por su bajo costo y por manejar presiones de condensación más bajas y porque además se puede tener mejor control de la presión de descarga. Por lo general se utiliza una torre de enfriamiento para bajar la temperatura del agua hasta una temperatura cercana a la temperatura de bulbo húmedo, permitiendo un flujo continuo y disminuir costos en el consumo de agua.

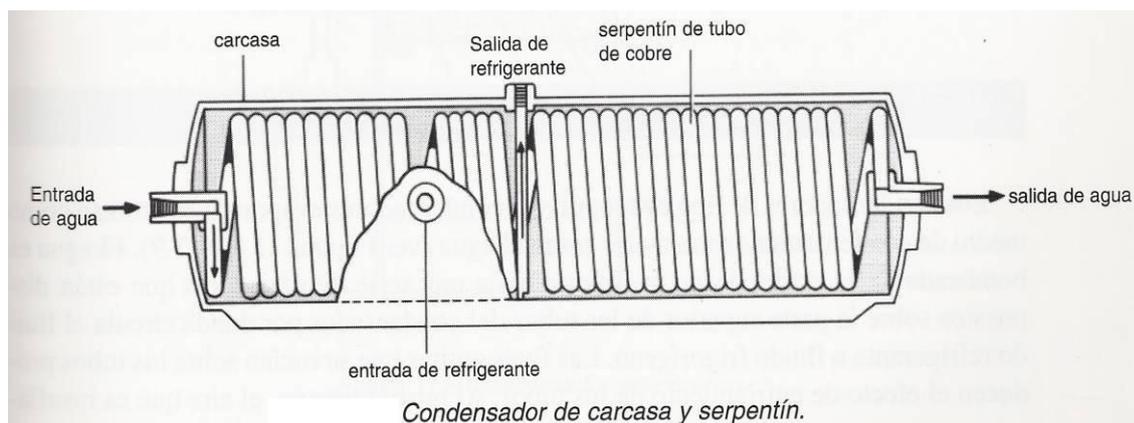


Figura 13. Condensador de carcasa y serpentín.

Debido a este tipo de diseño se debe tener en cuenta la velocidad del agua a través del condensador - = 2.13 m/s - , problemas de cavitación que se pueden generar por las condiciones variables de presión y de temperatura, mantener una presión positiva en el condensador. La corrosión, la incrustación y la congelación son los principales problemas que se deben controlar en las actividades de mantenimiento.

Destilación a vacío

La destilación es una operación utilizada con frecuencia para la purificación y aislamiento de líquidos. La destilación aprovecha las volatilidades y puntos de ebullición de los componentes líquidos a separar.

En este caso se utiliza la destilación a baja presión, que permite disminuir la temperatura de ebullición hasta niveles aceptables para no requerir demasiada energía en alcanzar el punto de ebullición del mercurio.

Tanque de almacenamiento vertical de techo flotante

El techo flotante se emplea para almacenar productos con alto contenido de volátiles como son: alcohol, gasolinas y combustibles en general.

Este tipo de techo fue desarrollado para reducir o anular la cámara de aire, o espacio libre entre el espejo del líquido y el techo, además de proporcionar un medio aislante para la superficie del líquido, reducir la velocidad de transferencia de calor al producto almacenado durante los periodos en que la temperatura ambiental es alta, evitando así la formación de gases (su evaporación), y consecuentemente, la contaminación del ambiente y, al mismo tiempo se reducen los riesgos al almacenar productos inflamables.

Scrubber

Durante el proceso de combustión los contaminantes presentes en los residuos son transferidos, básicamente a la corriente gaseosa, formándose además nuevos contaminantes durante el proceso, es por esta razón que se requiere de una torre de lavado de gases o scrubber, del cual su principio general es adherir la partículas sólidas a un vehículo líquido para su mayor facilidad de separación.

A grandes rasgos podemos decir que el tratamiento de gases, puede procurar atender tres objetivos:

Remoción de particulado (captura de partículas), remoción de constitutivos ácidos y remoción de material orgánico volátil.

Los lavadores de gases son comúnmente utilizados en gases de proceso para eliminar el polvo y los contaminantes potencialmente dañinos. En general, se mezclan agua con sustancias químicas activas añadiéndola al proceso en forma de spray con el flujo de gases. Los contaminantes en la corriente de aire se eliminan mediante cualquiera de las reacciones químicas o absorción con la solución de agua.

En la siguiente figura se muestra el funcionamiento:

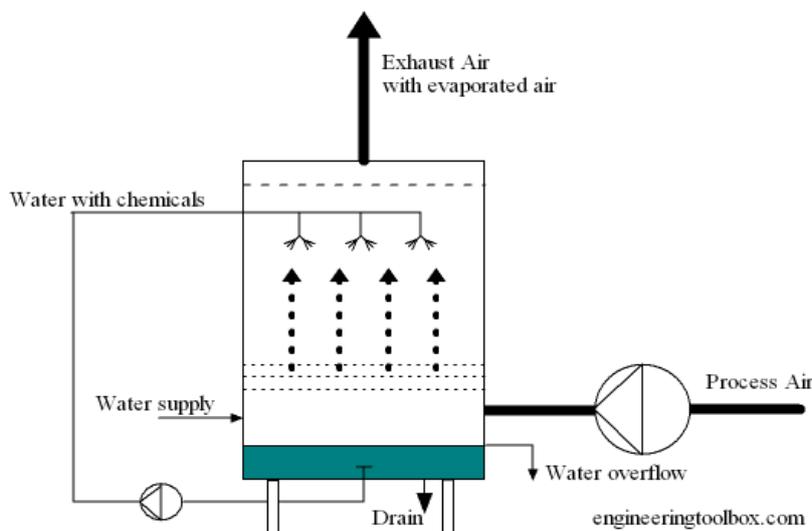


Figura 14. Scrubber.

Filtro de carbón activo

Son diseñados para la absorción de gases y vapores, provenientes de alguna actividad industrial.

El funcionamiento de estos filtros se basa en la absorción por medio del carbón activo, aquel que después de ser adecuadamente tratado se le confiere una gran porosidad. Esto da como resultado una gran superficie interna, un mayor poder de retención y una gran capacidad de absorción.

Algunos filtros quitan al menos un 99.97% de partículas de 0,3 micrómetros y son generalmente más eficaces para partículas que son más grandes o ligeramente más pequeños.

Vertedero:

Se puede almacenar sobre instalaciones en la superficie para el almacenamiento seguro, que son construcciones sobre el suelo especialmente diseñadas, construidas y equipadas para almacenar mercurio a largo plazo, evitando emisiones al ambiente.

Dentro de los criterios importantes se encuentran elegir zonas no susceptibles a terremotos, lugares de clima seco, distancia apropiada de aguas, parques y sistemas ambientales frágiles, buena estabilidad de suelos, proximidad de carreteras para el fácil acceso de transportación y servicios de emergencia, sellado de pisos resistentes al mercurio, no almacenar junto a otros residuos, tener control de temperatura y emisiones de vapor y seguir normas para el envasado.

RESULTADOS

PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE MERCURIO EN SUELOS DE LA ZACATECANA

De la tabla 6 y de la tabla 7 se obtienen los datos para realizar porcentaje de remoción de mercurio.

Utilizando el dato del resultado experimental (tabla 7) de la concentración de mercurio en el marrubio donde se suministra $5\mu\text{M}$, el cual fue la mínima cantidad utilizada en las macetas, y los datos más altos de cantidad de absorción por cada planta, sumando el resultado del tallo, el de las hojas, las flores y la raíz; tenemos la cantidad de absorción de Hg total por planta de marrubio de $121.95\mu\text{g Hg/g PS}$ (peso seco) = $121.95\text{mg Hg / Kg PS}$.

Entonces conforme al autor de la tesis de doctorado,¹⁸ como el mayor punto de contaminación por Hg en el muestreo de los suelos de la Zacatecana fue el 20 (tabla 6) con 47.95mg/kg , tenemos en este punto, una remoción del 254.32%

Lo mismo se realizó para el punto 20 del muestreo de los suelos de Hg con cada dosis diferente suministrada de mercurio en solución, para observar la variación del porcentaje de remoción en cada caso.

Se realiza con cada suministro de mercurio en solución, ya que cada especie de marrubio absorbe diferente cantidad.

Tabla 11. Porcentaje de remoción.

μM de Hg	Acumulación de la planta (mg Hg / Kg PS)	Muestra mayor de Hg en suelos (mg Hg / Kg)	% de remoción
0	34.42	47.95	71.78
5	121.95	47.95	254.22
10	181.85	47.95	397.249
50	387.63	47.95	808.404

A pesar de que el tiempo experimental fue llevado a cabo durante dos meses, se puede observar que el marrubio es una especie acumuladora, la cual dentro de todas las formas fitorremediadoras que existen conforme a su capacidad, puede ser evaluada como fitoestabilizadora o para revegetación del lugar. Aunque cabe mencionar que debido a la contaminación del lugar y los análisis hechos en la tesis de doctorado¹⁸ en suelos de la

Zacatecana, es posible proponerla para uso en fitoextracción por la cantidad de acumulación de mercurio del marrubio, ya que es suficiente para la remoción de mercurio que existe en esta área. Otro punto a su favor que tiene en este caso la fitoextracción, es el uso del suelo del área contaminada como agrícola.

CONTROL DE TIEMPO

Tomando en cuenta las actividades más importantes del proceso de fitorremediación, se estimó el tiempo total, conjuntando los detalles a seguir para completar el sistema de fitorremediación desde los inicios que es la investigación, hasta los resultados del porcentaje de remoción de mercurio del área contaminada.

Tabla 12. Plan de trabajo.

Plan de trabajo	No.	actividades a desarrollar	Años																																	
			I												II												III									
Meses			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8		
1		Organización de la metodología de trabajo para los miembros del grupo	█																																	
2		Capacitación de los miembros de trabajo e investigaciones de antecedentes	█	█																																
3		Verificación del sitio a tratar			█																															
4		Estudios del suelo (muestreo y análisis del contaminante)				█	█	█																												
5		Análisis de la especie acumuladora a nivel invernadero							█	█	█	█	█	█																						
6		Análisis de la especie acumuladora en campo													█	█	█	█	█																	

Se sabe que en 1kg solo hay 700,000 semillas viables y se requieren 1, 333,333.333 semillas, así que, aplicando una regla de 3 obtenemos:

1kg —————> 700,000 semillas viables
 X kg —————> 1, 333, 333.333 semillas requeridas

$$X = \frac{1\text{kg} * 1, 333, 333.333 \text{ semillas requeridas}}{700,000 \text{ semillas viables}} = \mathbf{1.9047 \text{ kg de semilla para } 400\text{ha}}$$

Da 1.9047 kg de semillas para 400ha las cuales se redondean a **2kg**.

TIEMPO DE COSECHA

El tiempo de cosecha puede ser realizado dentro de los 6 meses de floración, ya que es el ciclo normal de vida del marrubio, en este caso se toma en octubre ya que es a mediados de verano que termina su ciclo. Así podremos proceder a su respectivo tratamiento generalmente para obtener el contaminante y mantenerlo controlado.

Finalmente, realizando un análisis final de los potenciales resultados; podemos darnos cuenta que a pesar de ser teórico es un método efectivo y relativamente sencillo de utilizar para tratar estas áreas con una cantidad baja de contaminantes; como en la Zacatecana en Zacatecas, donde se propone una zona de 400 ha en la cual se podría realizarse una plantación de una densidad de **444,444** plantas de marrubio obteniendo un resultado final de mínimo 71.8 % de remoción de mercurio en un tiempo total contando todas las actividades para el paquete de fitorremediación, de 2 años y medio, lo que es bastante alentador para ayudar a esta población y muchas otras más con el mismo problema.

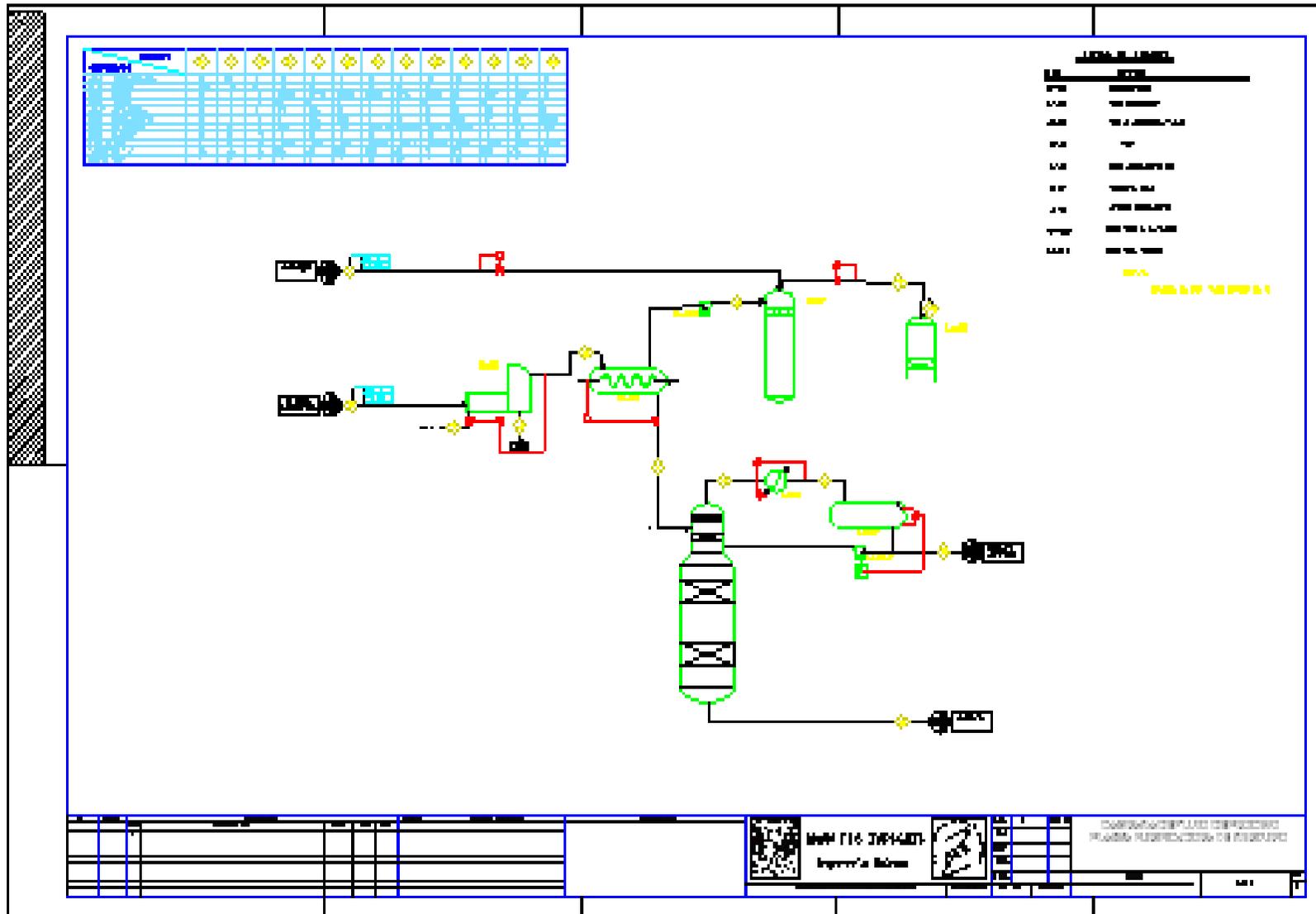
TRATAMIENTO DE RESIDUOS

Para finalizar con el proceso de fitorremediación se procedió a buscar un proceso de tratamiento para el mercurio y así disminuir los peligros en la salud y en el ambiente ya que si no se encuentra un lugar adecuado para este tóxico metal, éste seguirá su ciclo natural para seguir dañando nuestros alrededores.

En este caso se propone un proceso de reciclaje y purificación de mercurio para que este pueda ser confinado en un vertedero de una forma más estable y segura.

El DFP realizado en autocad, la lista de equipos y el balance de masa se muestran a continuación:

Esquema 2. Diagrama de flujo de proceso:



Lista de quipo:

Se muestra la lista de equipo que se encuentra en el DFP para mayor visibilidad.

CLAVE	SERVICIO
BA – 400	HORNO ROTATORIO
EA – 400	TANQUE CONDENSADOR
DA – 400	TORRE DE DESTILACIÓN A VACÍO
EA – 401	ENFRIADOR
FA – 400	TANQUE ACUMULADO DE Hg
DA – 401	LAVADOR DE GASES
FG - 400	FILTRO DE CARBON ACTIVO
GA – 400 R	BOMBA DE TORRE DE DESTILACIÓN
GA – 401 R	BOMBA TORRE LAVADORA

Balance de masa:

Se muestra el balance de masa del DFP para mayor visibilidad.

UNIDADES	CORRIENTE/COMPONENTE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Kg/h	PLANTAS COSECHADAS	0	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lt/k	AGUA/SOSA	600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kg/h	MERCURIO	0	0	0	0.00116	0.02204	0.0209	0.0209	0.0209	0.0209	0	0.0011	0.0011	0
Kg/h	ESCORIAS	0	0	0	51	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kg/h	CENIZAS VOLANTES	0	0	0	8.3	0.04	0	0	0	0	0	0.04	0	0
Kg/h	GASES DE COMBUSTION	0	0	0	0	0.06	0.04	0	0	0	0.04	0.02	0.01	0.004
Kg/h	AGUA DE PROCESO	0	0	0	0.15	0.45	0.27	209×10^{-5}	209×10^{-5}	209×10^{-5}	26.99	0.18	0.18	0.18
Kg/h	GAS NATURAL	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kg/h	FLUJO TOTAL	/	0	20	59.94	0.573	0.351	0.02092	0.02092	0.02092	27.03	0.2411	0.1911	0.1804
°C	TEMPERATURA	25	25	25	600	600	260	290	80	74	170	280	170	160
atm	PRESION	1	1	1	1	1	1	0.1	0.7	1	0.1	1	1	1

CONCLUSIONES

Este trabajo es una propuesta basada en la literatura y lo descrito experimentalmente. Se realizó un plan de trabajo de real importancia para conjuntar la propuesta de un paquete de fitorremediación de zonas contaminadas con mercurio. Se inicia con un marco general el cual puede ser aplicado a cualquier caso de fitorremediación, se aplica teóricamente a un caso en específico que entre varios estados el más cercano y útil para esta investigación fue una región en Zacatecas, para dar una mejor idea del sistema en aplicación.

Se ha hecho la búsqueda de información del lugar geográfico, hasta alcanzar una propuesta del lugar dónde se pueden llevar los residuos finales.

Se calcula el número de plantas necesarias para el área determinada, más los kilogramos de semillas de marrubio que se requieren de acuerdo al porcentaje de germinación y pureza para la cantidad de plantas en el sitio contaminado.

La información que se obtuvo para realizar el paquete permite hacer la propuesta, y para llevarla a cabo, se necesita de investigaciones más avanzadas y de tiempo para tener las herramientas y hacerlo real, es por eso que se llegan a unos resultados generales que permiten saber que es factible de hacerlo.

Un punto importante que se debe tomar en cuenta es la poca normatividad que existe en nuestro país, ya que se necesita lograr el control de los límites permisibles de cada elemento tóxico. Por esto mismo se realizó la búsqueda de las normas más cercanas a lo que se necesita, sin embargo se encontró que es urgente cambiarlas; hacer los análisis previos, completarlas y especificarlas para cada contaminante peligroso, ya que son muchos y se encuentran en grandes cantidades en el país.

Otro punto es la poca investigación que se realiza en México, esto más que nada debido a la falta de instrumentos y equipo especial de trabajo, además de lo económico y el poco apoyo del gobierno para facilitar las investigaciones en áreas muy contaminadas; que son encubiertas para que no se pierda el privilegio de la gente ambiciosa.

Además, se debe tener en cuenta el impacto que tienen estos metales en las personas que viven cerca de las zonas afectadas, por los graves problemas de salud que llegan a ser mortales o genéticos; es por eso hay que encontrar soluciones de manera inmediata y al mismo tiempo encontrar materiales alternos que no dañen el ambiente ni la salud de la población mundial.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda evaluar y analizar con mayor profundidad la capacidad de acumulación de metales pesados en plantas para la posterior aplicación en zonas contaminadas.
- Por motivos de salud y de seguridad a las personas, no deben utilizarse plantas comestibles para la fitorremediación.
- Se deben realizar estudios sobre la acumulación de metales pesados en el ganado para consumo humano. Además, se requieren estudiar otras posibles rutas de exposición vulnerables a las poblaciones humanas, tales como la inhalación de partículas así como vías de ingestión.
- Se recomienda la restricción del uso de predios donde se encuentren niveles de contaminación que sobrepasen los mínimos permitidos en normas nacionales.
- Como medida preventiva, se pueden llevar a cabo campañas de salud destinadas a revisiones de los residentes de las comunidades con concentraciones considerables de mercurio.
- Realizar una normatividad más específica sobre el uso de metales pesados en la industria y el comercio.
- Fomentar el uso de materiales alternos al uso del mercurio para poder disminuir su ciclo de contaminación, así evitando daños a los seres vivos y el medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Millán R., Carpena R.O., Schmid T., Sierra M.J., Moreno E., Peñalosa J., Gamarra R. y Esteban E. (2007). Rehabilitación de suelos contaminados con mercurio: estrategias aplicables en el área de Almadén. *Ecosistemas. Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente*. 2007/2
2. Moreno Jiménez Eduardo, Peñalosa Jesus M., Esteban Elvira, y Carpena Ruiz Ramón. (2007). Mercury accumulation and resistance to mercury estrés in *Rumex induratus* and *Marrubium vulgare* grown on perlite. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. Departamento de Química Agrícola, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid. Madrid, Mayo.
3. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Estadísticas del Medio Ambiente. México 1997.
4. 4, Merck & Co. (1983). *The Merck Index*. Tenth edition. Rahway, NJ.
5. Mario Yarto Ramírez, Arturo Gavilán García y José Castro Díaz. La contaminación por mercurio en México. *Gaceta ecológica*. Instituto nacional de ecología. Distrito federal, México, 072, 21-34
6. Jesús García, Ramcés de. (2007). Bioacumulación de mercurio en plantas silvestres de zonas mineras en México. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. México, Distrito Federal
7. Porta C. J, López Acevedo R. y Roquero de L. (1994). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi –Prensa, España.
8. El mercurio como elemento contaminante (2001). *Ambientum*
http://www.ambientum.com/revista/2001_18/2001_18_ATMOSFERA/LMRRCML1.htm
9. EPA. Mercury Study Report to Congress, Fate and Transport of Mercury in the Enviromental, (vol III, 1997).
Disponibile www.epa.gov/ttn/oarpg/t3/reports/volume3.pdf (consultado abril 2011)
10. Xavier Gaona Martínez. (2004). Mercurio como contaminante global. Universidad de Barcelona. España.
Disponibile http://www.tesisenxarxa.net/TESIS_UAB/AVAILABLE/TDX-1025104-165935/xgm1de1.pdf (consultado marzo 2011)
11. Simón Romero (2001, marzo 13). La guerra del oro. *El espectador*. Bogotá, Colombia.

Negocios

12. PNUMA. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Reducing risk from mercury. Programa sobre el mercurio
Disponible <http://www.chem.unep.ch/mercury> (abril 2011)
13. José Félix Zavala (2009, noviembre 27). La minería en Sierra Gorda Querétaro El oficio historiador. Querétaro.
Disponible <http://eloficiodehistoriar.com.mx/2009/11/27/la-mineria-en-la-sierra-gorda/> (consultado marzo 2011)
14. Instituto Nacional para el Federalismo y de Desarrollo Municipal (INAFED), Gobierno del Estado de Guerrero. Enciclopedia de los Municipios de México. Guerrero 2009.
15. Taxco lleva 450 años expuesto a la polución por metales: investigador (2008, septiembre 14). La jornada Guerrero. Guerrero, México.
16. José Alfredo Ramírez Álvarez, José Castro Díaz y Rocío Alatorre Eden (Junio 2000). Diagnostico del mercurio en México. Instituto Nacional de Ecología.
http://www.ine.gob.mx/descargas/sqre/Diagnostico_hg_mx_2002.pdf
17. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Disponible
<http://www.semarnat.gob.mx/leyesy normas/normas/Pages/normasoficialesmexicana svigentes.aspx> (consultado abril 2011)
18. Irma Cruz Gavilán García. (Julio 2010). Estudio de especiación de mercurio en suelos contaminados por residuos de amalgamación en México. Instituto Politécnico Nacional. México.
19. Hortensia Ortega Ortíz, Adalberto Benavides Mendoza, Roberto Arteaga Alonso y Alejandro Zermeno González. (2007). *Fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados*. Centro de Investigación en Química Aplicada. Saltillo, Coahuila México.
20. Nedelkoska T. V y Doran P. M. (2000). *Characteristics of heavy metal uptake by plant species with potencial for phytoremediation and phytomining*. *Minerals engineer*.
21. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)- Instituto Nacional de Ecología (INE). (2000). Indicadores de Desarrollo Sustentable en México.

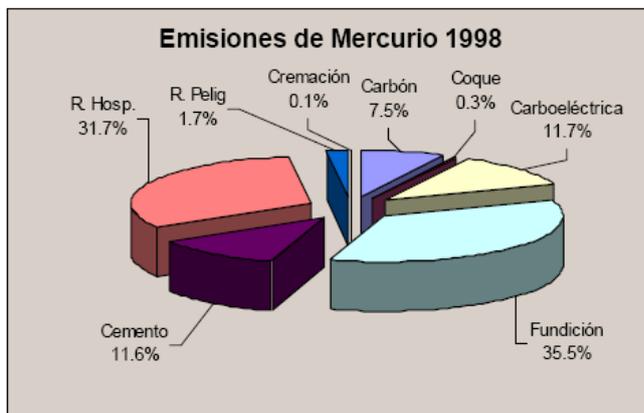
22. Zero Mercury Global Campaign. Zeromercury.org
23. Javier Flores. Descontaminan suelos con transgénicos. *La jornada en la ciencia*. Disponible <http://ciencias.jornada.com.mx/noticias/descontaminan-suelos-con-transgenicos> (consultado abril 2011)
24. Nagata T, Morita H, Akizawa T, Pan-Hou H. (2010 Jun). Development of a transgenic tobacco plant for phytoremediation of methylmercury pollution. Faculty of Pharmaceutical Sciences, Setsunan University, Japan. (Resumen)
Yakugaku Zasshi. (2010 Sep) Application of mercury-resistant genes in bioremediation of mercurials in environments. Faculty of Pharmaceutical Sciences, Setsunan University, Osaka, Japan. (resumen)
25. Radio Nacional de Venezuela (2010, julio 13). Venezolanos crean estrategia de rehabilitación para eliminar el mercurio. *Ciencia y ambiente*
Disponible <http://www.rnv.gob.ve/noticias/index.php?act=ST&f=14&t=132145> (consultado marzo 2011)
26. Chen B., Christie P. y Li L. (2001). *A Modified Glass Bead Compartment Cultivation System for Studies on Nutrient and Trace Metal Uptake by Arbuscular Mycorrhiza*. *Chemosphere*.
27. Robinson B. H, Lombi E, Zhao FJ and McGrath S. P. (2003) Uptake and Distribution of Nickel and other Metals in the Hyperaccumulator *Berkheya Coddii*. *New Phytologist*
28. Vidal Durango Jhon Víctor, Marrugo Negrete José Luis, Jaramillo Colorado Beatriz y Pérez Castro Libia María (2010). Remediación de suelos contaminados con mercurio utilizando guarumo (*cecropia peltata*). *Ingeniería y desarrollo*, 27, 113-129.
29. María Guadalupe López Domínguez (2009). Distribución y fitodisponibilidad de metales pesados (Sb, Hg, As) En los jales de la mina de antimonio de Wadley, estado de San Luis Potosí. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
30. Vetiveria Zizanioides
Disponible <http://www.tropicos.org/Name/25510042> (consultado marzo 2011)
31. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006. Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra.
32. Instituto Nacional de Ecología (INE)
Disponible. <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/459/cap4.html>

(Consultado mayo 2011)

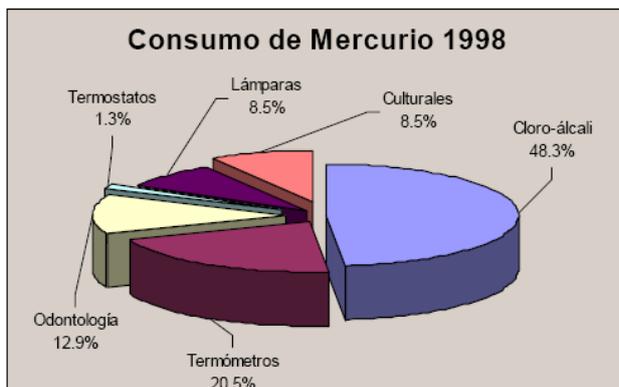
33. G. Kvesitadze, G. Khatishashvili, T. Sadunishvili y J.J. Ramsden (2006). *Biochemical mechanisms of detoxification in higher plants* (Basis of phytoremediation). Springer, Alemania. pp. 203-204
34. Peter J. Lego (2004). Método para facilitar el crecimiento vegetal en sustratos tóxicos contaminados con metales pesados. Oficina española de patentes y marcas. Disponible http://www.espatentes.com/pdf/2216845_t3.pdf
(Consultado mayo 2011)
35. Hudson T. Hartmann (1995). *Propagación de plantas, principios y prácticas Continental*. 4ta reimpresión, México, pp. 197-199
36. David A. Atwood (2006). *Recent developments in mercury science* (structure and bonding). Springer, Australia.
37. Gómez Bermejo, Roberto Javier. (2010). Uso de plantas silvestres para fitorremediación de sitios contaminados con cromo. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. México, Distrito Federal.
38. Sanchez U. J.E. y A. Sanz-Mendel. (1998). *Inorganic and Methylmercury speciation in environmental samples*. Talanta.
39. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. (PROFEPA). Dirección General de Inspección de Fuentes de Contaminación. México 2002
<http://www.profepa.gob.mx/>
40. José J. Guerrero Rojas y Zoila Ortiz Gárate. Biorremediación de la contaminación por mercurio en minería informal. 8vo congreso Nacional de Minería. Perú, octubre 2010. 7 p.
41. Agencia para las Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. Departamento de Salud y Servicios Humanos de los Estados Unidos. Disponible <http://www.atsdr.cdc.gov> (consultado marzo 2011)
42. Xavier Elías Castells (2006). *Reciclaje de residuos industriales*. Ediciones Días de santos, España, 609p.
43. Robert H. Perry. (1992). *Manual del Ingeniero Químico*. Ed. McGraw Hill, 6ta Edición. México, 2577 p.

ANEXOS

A. Estimación de las Emisiones de Mercurio en México en 1998



B. Consumo de Mercurio en México en 1998



C. Minas de mercurio en México. INE-COREMI-SECOFI

Estado	Minas de mercurio	Minas que contienen mercurio	Total de minas
Colima	1	0	1
Coahuila	2	0	2
Chihuahua	28	3	31
Durango	27	9	36
Guanajuato	11	9	20

Guerrero	58	5	63
Jalisco	8	1	9
México	4	0	4
Michoacán	1	0	1
Nuevo León	1	0	1
Querétaro	23	3	26
San Luis Potosí	25	3	28
Sonora	1	0	1
Tamaulipas	6	0	6
Zacatecas	53	4	57
Total	249	37	286