



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

ANÁLISIS RETROSPECTIVO DEL MERCURIO

COMO CONTAMINANTE GLOBAL

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

QUÍMICO

PRESENTA

ERIK LEONEL TREJO GARCÍA



MÉXICO, D.F

2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: MARÍA RAFAELA GUTIÉRREZ LARA

VOCAL: GEMA LUZ ANDRACA AYALA

SECRETARIO: ARTURO GAVILÁN GARCÍA

1er. SUPLENTE: SERGIO ADRIÁN GARCÍA GONZALEZ

2° SUPLENTE: ALEJANDRA MENDOZA CAMPOS

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO (INECC)

ASESOR:

ARTURO GAVILÁN GARCÍA

SUSTENTANTE:

ERIK LEONEL TREJO GARCÍA

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS	3
JUSTIFICACIÓN	4
OBJETIVOS	6
CAPÍTULO I. EL MERCURIO Y SU ORIGEN	7
I.1. Historia del mercurio.	7
I.2. Historia del nombre mercurio.	10
CAPÍTULO II. QUÍMICA DEL MERCURIO	13
II.1. Propiedades del mercurio.	13
II.2. El mercurio y sus formas químicas.	18
II.3 El mercurio y su transformación en la atmósfera.	19
II.4 El mercurio y su transformación en medios acuáticos.	21
II.5 El mercurio y su transformación en suelos.	22
CAPÍTULO III. FUENTES DE EMISIÓN Y USOS	24
III.1 Fuentes naturales de Hg.	24
III.2 Fuentes antropogénicas.	25
III.3 Usos del mercurio.	27
CAPÍTULO IV. TOXICOLOGÍA EFECTOS A LA SALUD Y AMBIENTE	30
IV.1 El mercurio y sus efectos tóxicos.	30
IV.2 Efectos sistémico del mercurio.	31
IV.3 Efectos al ambiente.	32

CAPÍTULO V. ANTECEDENTES DEL MERCURIO COMO CONTAMINANTE GLOBAL Y LEGISLACIÓN	36
V.1 Eventos históricos que marcaron al mercurio como contaminante.	36
V.1.1 Evento en Irak.	37
V.1.2 Evento en Japón.	37
V.1.3 Evento en Perú.	40
V.1.4 Eventos en Amazonas.	40
V.2 Antecedentes Convenio de Minamata.	41
V.3 Antecedentes en México.	45
CAPÍTULO VI. HACIA EL FUTURO DEL MERCURIO	48
VI.1 Prevención y control.	48
VI.2 Medidas.	50
VI.3 Actividades realizadas para lograr un manejo seguro del mercurio.	52
CONCLUSIONES	56
REFERENCIAS	59

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

Tablas

Tabla II.1. Propiedades físico-químicas de compuestos de mercurio.	14
Tabla IV.1. Tipos de exposición.	30
Tabla V.1 Catástrofes mundiales	36
Tabla VI.1. Panorama general de los acuerdos o instrumentos internacionales que contienen disposiciones relativas al mercurio.	52
Tabla VI.2. Panorama general de los programas y organizaciones internacionales con actividades relacionadas con los efectos adversos del mercurio en la salud y el medio ambiente.	54
Tabla VI.3. Panorama general de las iniciativas subregionales y regionales relacionadas con los efectos adversos del mercurio en la salud y el medio ambiente.	55

Figuras

Figura II.1. Interacciones del mercurio entre los compartimentos ambientales.	15
Figura II.2. Modelo de las interacciones entre las especies de mercurio en la atmósfera.	19
Figura II.3. Interacciones entre las diversas especies de mercurio en aguas oceánicas.	22
Figura III.1. Principales fuentes de emisión de mercurio.	25
Figura III.2. Fuentes de generación de mercurio.	26
Figura III.3. Uso doméstico mercurio.	28
Figura III.4. Balance de entrada y salida de mercurio para diferentes usos.	29
Figura IV.1. El mercurio en la salud humana.	32
Figura IV.2. Como el mercurio entra en el ambiente.	34
Figura V.1 Línea de tiempo de eventos de Minamata.	39
Figura V.2 Línea del tiempo de eventos globales sobre el mercurio.	44
Figura V.3 Marco legal de residuos en México.	47

JUSTIFICACIÓN

A raíz de la creciente preocupación mundial sobre los riesgos del manejo inadecuado de las sustancias químicas se crearon diversos organismos internacionales para atender los retos que representan éstos materiales a nivel internacional; entre estos, los que se destacan son el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte (CCA), la Organización Mundial de la Salud, etc. Por otro lado, se han firmado diversos convenios internacionales, tales como el Convenio de Basilea sobre el movimiento transfronterizo de residuos, Convenio de Róterdam sobre el Consentimiento Informado Previo (PIC por sus siglas en inglés) para el comercio internacional de productos químicos, el Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes, el Convenio de la Paz entre México y Estados Unidos, el Programa Frontera 2020, y el Enfoque Estratégico para la Gestión de Productos Químicos a Nivel Internacional (SAICM por sus siglas en inglés). A través de estas iniciativas se ha puesto particular énfasis en resaltar que el manejo de las sustancias químicas sólo puede ser efectivo si se utiliza el enfoque de prevención a lo largo del ciclo de vida de las sustancias químicas. Asimismo, en las últimas fechas, se está discutiendo la creación del Convenio de Minamata, sobre el control de mercurio.

Es de resaltar que, la implementación de medidas restrictivas relacionadas con el manejo de sustancias químicas, entre ellos para el mercurio, se debe tener en cuenta el impacto económico que dichas medidas representarán a corto, mediano y largo plazo, así como el impacto de las acciones normativas y la disponibilidad de nuevas alternativas.

Para el caso particular del mercurio todas las iniciativas se enfocan en prevenir la liberación de emisiones al ambiente y evita sus efectos directos o indirectos en la salud humana a través del control de su uso en diversos sectores y procesos.

Como parte de las iniciativas que varios países han implementado en materia de mercurio, se encuentran:

- Normas de calidad ambiental, que fijan la concentración máxima aceptable de mercurio para diferentes compartimentos ambientales, así como para el consumo de alimentos, particularmente de pescado.
- Acciones regulatorias para el control de productos como baterías, cosméticos, amalgamas dentales, lámparas, pinturas/pigmentos, plaguicidas, productos farmacéuticos, etc.
- Iniciativas regulatorias y programas que establezcan límites de exposición laboral.
- Inventarios sobre uso y liberaciones de giros industriales y de forma no intencional.

Para el caso de México, a través de la firma del Convenio de Minamata, firmado el 11 de octubre de 2013 y ratificado por el senado en junio de 2014, se espera que se establezca un plan nacional de implementación para los siguientes años.

OBJETIVOS

Objetivos General

- Analizar la cronología de sucesos que, a lo largo de la historia, han marcado la ruta crítica para el establecimiento de políticas globales del uso de mercurio y evaluar críticamente sus áreas de oportunidad.

Objetivos Específicos

- Documentar los acontecimientos más importantes históricamente para que diera lugar a evaluar la problemática de mercurio y plantar acciones de solución para el caso nacional.
- Establecer cuál es el panorama mundial del mercurio y las consideraciones técnicas, económicas y sociales que pueden afectar la implementación de medidas en el país.

CAPÍTULO I

EL MERCURIO Y SU ORIGEN

I.1 Historia del mercurio

Algunas referencias indican que el mercurio fue conocido desde la época de los egipcios: En una tumba de Kuran, de la dinastía que gobernó entre el 1500 a.C al 1300 a.C., se encontró un poco de mercurio líquido en una vasija funeraria [1].

En China y el Tíbet existen registros del uso del mercurio para prolongar la vida, curar fracturas y mantener una buena salud en general [2].

El primer emperador de China, Qín Shǐ Di de Huang, fue enterrado en una tumba que contenía ríos de mercurio que fluían en un modelo que representa los ríos de China y que la causa de su muerte fue por beber una mezcla de mercurio y jade, el cual era un polvo formulado por los alquimistas (causaba insuficiencia hepática, envenenamiento y muerte cerebral) que tenían la intención de darle la vida eterna [3, 4].

Otros documentos, reportan que los griegos usaban mercurio en ungüentos y que los egipcios y los romanos lo utilizaron en cosméticos [1].

Hylander (2002) reporta que en Lamanai (ubicado al norte de Belice), que alguna vez fue una ciudad importante de la civilización maya, se encontraba una piscina de mercurio debajo de un campo utilizado para el juego de pelota [5].

En el año 500 a.C el mercurio se utilizaba para hacer amalgamas con otros metales en las civilizaciones antiguas como en Egipto, India y China [6].

Los alquimistas veían al mercurio como la primera materia de la cual se podían formar todos los metales. Se pensaba que los diferentes metales se formaban mediante la variación de la calidad y la cantidad de azufre contenida dentro del mercurio y se consideraba que el más puro de estas mezclas era el oro [7].

Como sucede con la mayoría de los elementos en la naturaleza, existe una cantidad fija de mercurio en el planeta, la cual es la misma desde la formación del mismo. El mercurio se ha movilizó a través de la corteza, la atmósfera, los suelos y los cuerpos de agua en periodos de tiempo que datan desde hace decenas de miles de años; asimismo, existen pruebas de que el mercurio ha sido utilizado por diferentes culturas a lo largo de la antigüedad. De hecho un esqueleto humano que data de 5000 a.C en China fue encontrado cubierto de bermellón también conocido como cinabrio (HgS) [8].

La extracción mineral del mercurio data de al menos la época de los romanos, quienes operaron una mina en España y utilizaron el mercurio como un pigmento en sus pinturas; esto se sabe porque fueron encontradas enterradas por la ceniza volcánica del Vesubio en el 79 a.C.; el uso del mercurio en la pintura ha continuado hasta la era moderna [9].

Aristóteles se acredita el registro conocido más antiguo sobre mercurio en un texto académico, en el que se refirió como “plata fluida” y “azogue”. Este texto trasmite su creencia que el mercurio era un componente en todos los metales y menciona que era utilizado en ceremonias para el tratamiento de trastornos de la piel [10].

Alrededor del año 500 a.C en India y China fue utilizado como un afrodisíaco y para terapia médica. Se reporta que mujeres chinas consumieron mercurio como anticonceptivo desde hace 4.000 años. El cinabrio todavía se utiliza como un sedante en la medicina tradicional china [4].

Para el año 1000 a.C, se utilizó para extraer el oro mediante el proceso de amalgamación. Este proceso todavía se practica en la extracción de oro a pequeña escala de manera artesanal [11].

El mercurio fue utilizado en equipos de medición, por ejemplo en el barómetro de Torricelli en 1643 y el termómetro de Fahrenheit en 1720. Actualmente, y dada su precisión, aún se utilizan es tipo de termómetros en el sector salud.

En 1759 Adam Braun y Mikhail Lomonosov trabajaron en San Petersburgo (Rusia) para la obtención de mercurio sólido mediante la congelación de un termómetro en una mezcla de nieve y ácido nítrico concentrado. Esto proporcionó una evidencia de que el mercurio tenía propiedades similares a otros metales [12].

Durante la revolución industrial, varios inventos aumentaron la demanda de mercurio. En 1799, el fulminato de mercurio se utilizó por primera vez como un detonador de explosivos [13].

En 1835, se produjo por primera vez cloruro de polivinilo (PVC), la síntesis original uso de base el mercurio como catalizador.

En 1891, la lámpara incandescente de Thomas Edison contenía mercurio.

En 1894, Castner descubrió que el mercurio se podría utilizar en el proceso de cloro-álcali para producir cloro y sosa cáustica a partir de sal común.

A comienzos de 1900, los principales usos del mercurio estaban en la fabricación de equipos de medición, la recuperación de oro y plata, fabricación de fulminato de mercurio y producción de bermellón [14].

Durante la segunda guerra mundial la batería Ruben-Mallory (batería de mercurio) fue inventada y ampliamente utilizada.

Por la década de 1960 la producción de aparatos eléctricos, sosa cáustica y cloro representó más del 50% de los usos del mercurio. La sosa cáustica fue asociada en gran medida con la industria papelera que lo utiliza para el blanqueo del mismo. La industria del cloro-álcali sigue representando el 1% del total de emisiones de mercurio a la atmósfera, así como una fuente potencial a la descarga en cuerpos de agua y suelo (UNEP 2005).

Desde 1960, varias minas de mercurio fueron abiertas en los países del bloque soviético, China, Kazajstán, Argelia, México y el estado norteamericano de Nevada.

I.II Historia del nombre mercurio

Hg es el símbolo químico moderno para el mercurio. Viene de hydrargyrum, una forma latinizada de la palabra griega ὑδράργυρος (“hydrargyros”), que es una palabra compuesta que significa "agua de plata" (de hydr- ὑδρ, la raíz de ὕδωρ, "agua", y ἄργυρος argyros "plata") ya que es líquido como el agua y brillante como la plata. El elemento fue nombrado en honor al dios romano Mercurio, conocido por su velocidad y movilidad. Se asocia con el planeta Mercurio; el símbolo astrológico para el planeta es también uno de los símbolos alquímicos para el metal; la palabra sánscrita para la alquimia es Rasavātam que significa "el camino de mercurio" [15]

Thales (VII a.C.), hace referencia a este elemento cuando alude que el principio común de todas las cosas, era el agua (agua plateada); éste comenzó a mencionarse en los escritos de Teofrasto datados en el 300 a.C. en los cuales ya se explicaba la obtención del metal tratando su mineral más común, el sulfuro previamente triturado con vinagre, en un mortero de latón. Dicho sulfuro, que conocemos como cinabrio (nombre

procedente del latín CINNABARI, que a su vez lo hace del griego KINNABARI), es uno de los minerales más antiguos empleados ya por el hombre del paleolítico, que lo pulverizaba, mezclaba con grasa animal obteniendo una pintura rojiza, con la que decoraban sus cavernas. El KINNABARI griego hace referencia a dicho color rojizo [10].

Teofrasto también explicaba otra forma de obtener mercurio la cual era, destilando cinabrio con hierro. A este mercurio lo había llamado Aristóteles como HYDRARGYRIUM, que significaba agua de plata, o plata líquida. Dicho nombre revela que lo que más llamó la atención al hombre de este metal, es precisamente que fuera líquido, brillante como la plata, a su vez pesado y capaz de fluir y correr, ya que no se extendía como el agua, originando el griego actual HYDRARGYROS.

Los romanos Plinio y Vitrubio estudiaron el mercurio y sus propiedades. El primero distingue dos tipos de mercurio, el nativo que llama ARGENTUM VIVUM (plata viva, plata que se mueve) y el obtenido a partir del cinabrio, esto es el HYDRARGIRIUM. Plinio indica varios métodos para preparar mercurio desde el cinabrio, pero incurre en el error de llamar MINIUM, al así obtenido. Esta referencia origina algunas consecuencias curiosas, así surge el nombre de río MINIUS (actual río Miño), por la coloración rojiza de sus aguas que arrastraban mucha arcilla, pues tanto el MINIO como el CINABRIO, significan exactamente lo mismo: algo rojizo [10].

En los escritos de Plinio se recomienda a los mineros que extraen el cinabrio, que cubran sus caras con una tela fina para no aspirar el polvo. Estas telillas van a ser las precursoras de las mascarillas. Desde tiempos muy antiguos eran conocidas las enfermedades producidas por el mercurio, algunas daban como resultado un temblor característico. Este hecho se asoció a todo movimiento nervioso y así se introdujo el vocablo AZORARSE y en gallego AZOUGARSE, por ponerse nervioso que inicialmente debió significar estado de envenenamiento por el AZOGUE, denominación castellana del mercurio. El AZOGUE, derivaría del verbo árabe ZAUQ, que significa algo que corre. También podría derivar del árabe SUQA, procedente de SAQA, con el mismo significado. Los árabes lo utilizaron mucho, por ello no es de extrañar que Abderramán III, califa de Córdoba, instalara en su palacio una fuente de mercurio [10].

En los primeros textos alquimistas hebreos de María la judía, se menciona al mercurio con múltiples nombres derivados de la misma raíz. Aparece como ZUBBECHS, ZUBECH, ZĪBAK y ZIBEIC que darán el árabe ZAIBAQ y por ello en la Edad Media se conoció como ZAIBAR que deberá ser el padre del AZOGUE. Como podemos observar, la raíz fundamental de todos sus nombres está determinada por su característica como líquido [10].

Zósimo, el tebano o panapolitano (III-IV d. C.), en su tratado sobre el AGUA DIVINA, hace referencia con ese nombre al mercurio, al que considera principio andrógino, diciendo que no es un metal, ni agua y está siempre en movimiento, ni un cuerpo; es el todo, tiene una vida y un espíritu. Por eso los alquimistas posteriores, consideraron al mercurio como el principio de todas las cosas. Contemporáneo a Zósimo, Pseudo Demócrito elaboró una serie de recetas para obtener oro a partir de mercurio, fijándolo con azufre, entre otras sustancias [10].

CAPÍTULO II

QUÍMICA DEL MERCURIO

II.1 Propiedades del Mercurio

El mercurio elemental (“Azogue”; “Hidrargirio”; “Mercurio coloidal”; fórmula: Hg^0 ; N° CAS 7439-97-6) es un elemento de color plateado, inodoro, 13,5 veces más denso que el agua. Tiene una muy baja presión de vapor, un punto de ebullición de $356.72\text{ }^\circ\text{C}$ y emite vapores a temperatura ambiente. Es buen conductor de la electricidad y su coeficiente de dilatación es prácticamente constante. Es el único metal que se encuentra en estado líquido a temperatura ambiente [16].

El mercurio es relativamente insoluble en agua ($56\text{ }\mu\text{g/L}$ a 25°C), soluble en lípidos y ácido nítrico, soluble en ácido sulfúrico pasado el punto de ebullición. Reacciona violentamente con metales alcalinos, acetileno, azidas, amoníaco, cloro, dióxido de cloro, carburo sódico y óxido de etileno. Reacciona con otros metales (oro, plata, platino, uranio, plomo, sodio y potasio) formando amalgamas. Puede ser encontrado en forma elemental o en compuestos inorgánicos y orgánicos. El Hg reconoce también tres estados de oxidación: elemental (Hg^0), mercurioso (Hg^+) y mercúrico (Hg^{2+}) [17].

Los compuestos inorgánicos de Hg surgen a partir de sus formas catiónicas mono y bivalentes. Los principales sales son cloruro, nitrato, sulfuro, acetato de mercurio y óxidos de mercurio (óxido mercurioso y mercúrico) [18]. Los compuestos orgánicos de mercurio son aquellos que contienen enlaces covalentes entre el carbono y el metal, por ejemplo el metilmercurio, el dimetilmercurio, el cloruro de metilmercurio y el fenilacetato de mercurio formados por intervención de procesos enzimáticos en sistemas biológicos [19].

En la Tabla II.1 se presenta un resumen de las propiedades físicas y químicas de los diferentes compuestos de mercurio

Tabla II.1. Propiedades físico-químicas de compuestos de mercurio

Nombre y formula	N° de registro CAS	Masa molecular g/gmol	Punto de fusion (°C)	Descripción física	Densidad (g/L)	Solubilidad
Mercurio (metálico) Hg	7439-97-6	200.59	-38.87	Metal líquido plateado	13.546(20°C)	Soluble en ácido nítrico , ácido sulfúrico en ebullición pesada , lípidos , pentano ; insoluble en ácido clorhídrico diluido, bromhídrico y ácidos yodhídrico , agua, etanol , éter dietílico , ácido sulfúrico frío
Acetato de mercurio Hg(CH₃OO)₂	1600-27-7	318.7	178-180	Cristales blancos o polvo cristalino	3.27(20°C)	Soluble en agua (250 g/L a 10°C) etanol, ácido acético.
Cloruro de mercurio HgCl	7487-94-7	271.50	276	Incoloro, rómbico , inodoro , cristal o polvo blanco	5.44(25°C)	Soluble en agua (69g/L a 10°C), metanol, etanol, alcohol amílico, acetona, ácido formico , ácido acético, poco soluble en éter dietílico , benceno, glicerol, disulfuro de carbono y piridina.
Oxido de mercurio HgO	21908-53-2	216.6	500	Amarillo o rojo , ortorrómbico , Polvo cristalino inodoro.	11.14 (25°C)	Insoluble en agua (53 mg/L a 20°C), soluble en ácidos, insoluble en etanol dietil éter acetona , alcanos, amoniaco.
Dimetil mercurio Hg(CH₃)₂	593-74-8	230.66	No reportado	Es un líquido incoloro con un olor dulce	3.19(0°C)	Soluble en etanol y dietil éter, insoluble en agua
Cloruro de metilmercurio HgCH₃Cl	115-09-3	251.10	167-168	Sólido cristalino blanco con un olor desagradable	4.06 (20°C)	Ligeramente soluble en agua
Acetato de fenilmercurio CH₃COOHgC₆H₅	62-38-4	336.75	150	Blanco o blanco amarillento , pequeño , inodoro , cristalino brillante sólido	2.4(25°C)	Soluble en etanol, benceno, ácido acético glacial, acetona , acetato de amonio, cloroformo, dietil éter ligeramente soluble en agua (4.37g/L a 25°C)

(Elaboración propia)

El mercurio se encuentra de manera natural en el medio ambiente y existe en variedades de formas, y especies químicas; al igual que el plomo y el cadmio se denominan metales pesados. En su forma pura, se lo conoce como mercurio “elemental” o “metálico. Pocas veces se le encuentra en su forma pura, como metal líquido; es más común en compuestos y sales inorgánicas. El mercurio puede enlazarse con otros compuestos como mercurio monovalente o divalente (representado como Hg(I) y Hg(II) o Hg²⁺). A partir del Hg(II) se pueden formar muchos compuestos orgánicos e inorgánicos de mercurio [20].

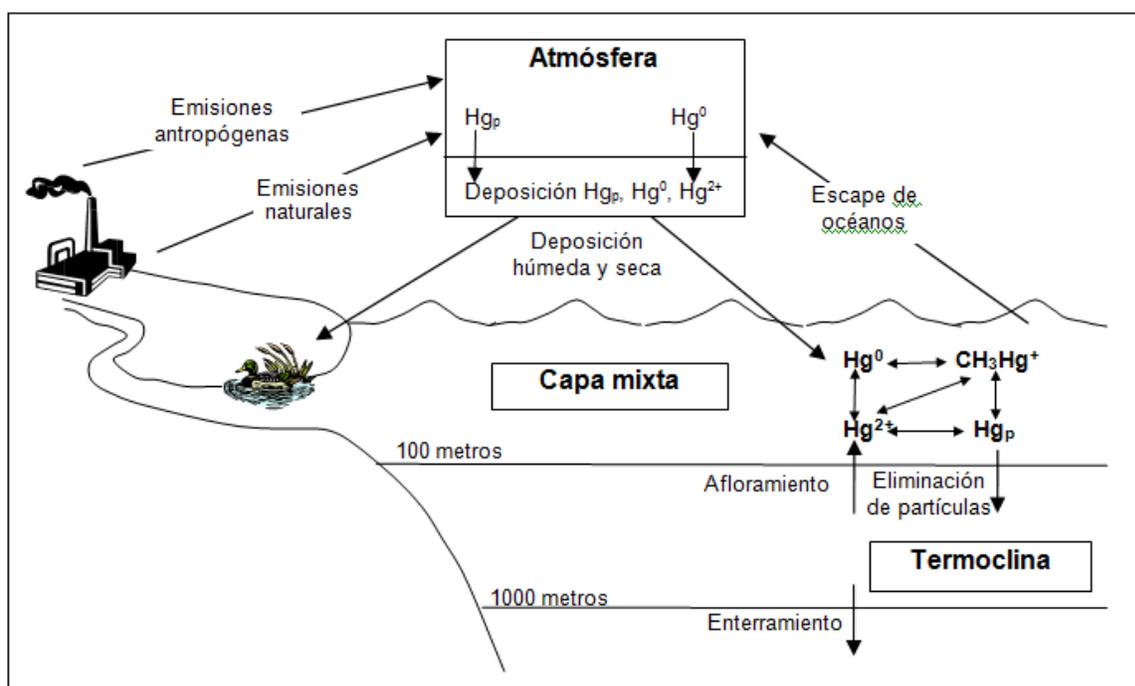


Figura II.1 Interacciones del mercurio entre los compartimentos ambientales (Lamborg 2002).

El mercurio se extrae como sulfuro de mercurio. La forma metálica se refina a partir del mineral de sulfuro de mercurio calentando el mineral a temperaturas superiores a los 540° C. Se vaporiza el mercurio contenido en el mineral, y luego se captan y enfrían los vapores para formar el mercurio metálico que se encuentra en estado líquido [21].

Algunos de los compuestos inorgánicos de mercurio son: el ya mencionado sulfuro de mercurio (HgS), óxido de mercurio (HgO) y cloruro de mercurio (HgCl₂) como se refiere en la Tabla II.1 estos compuestos también se les conoce como sales de mercurio. La mayoría de los compuestos inorgánicos de mercurio son polvos o cristales blancos, excepto el sulfuro de mercurio, que es rojo y se vuelve negro con la exposición a la luz. Algunas sales de mercurio son lo bastante volátiles para existir como vapor en la atmósfera. La solubilidad en agua y reactividad química de estos gases inorgánicos de mercurio hacen que su deposición de la atmósfera sea mucho más rápida que la del mercurio elemental. Esto significa que la vida atmosférica de los vapores de mercurio provenientes de compuestos inorgánicos es mucho más corta que de la evaporación de mercurio elemental [22].

Cuando el mercurio se combina con carbono se forman compuestos conocidos como organomercuriales. Existe una gran cantidad de compuestos orgánicos de mercurio (como el dimetilmercurio, fenilmercurio, etilmercurio y metilmercurio), el más conocido de todos es el metilmercurio (por efectos que tiene en la cadena trófica). Al igual que los compuestos inorgánicos de mercurio, el metilmercurio y el fenilmercurio existen como “sales” (por ejemplo, cloruro de metilmercurio o acetato de fenilmercurio). Cuando son puros, casi todos los tipos de metilmercurio y fenilmercurio son sólidos blancos y cristalinos. En cambio, el dimetilmercurio es un líquido incoloro [23].

Varias formas de mercurio existen de manera natural en el ambiente. Las formas naturales de mercurio más comunes son el mercurio metálico, sulfuro de mercurio, cloruro de mercurio y metilmercurio. Ciertos microorganismos y procesos naturales pueden hacer que el mercurio en el ambiente pase de una forma química a otra [24].

El mercurio elemental en la atmósfera puede transformarse en formas inorgánicas, lo que abre una significativa vía para la sedimentación de mercurio elemental emitido [25].

El compuesto orgánico de mercurio más común generado por los microorganismos y procesos naturales es el metilmercurio. El metilmercurio es particularmente importante porque puede bioacumularse y biomagnificarse a lo largo de la cadena alimenticia [24].

El mercurio no se puede descomponer ni degradarse en sustancias inofensivas. Éste puede cambiar de estado y especie pero su forma más simple es el mercurio elemental, que causa efectos nocivos para los seres humanos y el medio ambiente. Una vez liberado a partir de los minerales, o depósitos de combustibles fósiles yacentes en la corteza terrestre, y emitido a la biosfera, el mercurio puede tener una gran movilidad y circular entre la superficie terrestre y la atmósfera. Los suelos superficiales de la tierra, las aguas y los sedimentos de fondo se consideran los principales depósitos biosféricos de mercurio (Figura II.1) [25].

En condiciones naturales, el mercurio se encuentra en alguno de los siguientes estados:

- Como vapor metálico y mercurio líquido/elemental;
- Unido a minerales que contienen mercurio (sólido);
- Como iones en solución o unido a compuestos iónicos (sales inorgánicas y orgánicas);
- Como complejos iónicos solubles;
- Como compuestos orgánicos no iónicos gaseosos o disueltos;
- Unido a partículas o materia orgánica o inorgánica mediante adsorción iónica, electrofílica o lipofílica.

II.2 El mercurio y sus formas químicas

Las principales formas de mercurio existentes o “especies químicas” son el mercurio elemental, y sus formas orgánicas e inorgánicas [26].

La forma química de un compuesto desempeña un papel importante en la toxicidad y exposición de los organismos vivos. La especie influye, por ejemplo, en los siguientes aspectos:

- La disponibilidad física que determina la exposición (por ejemplo, si el mercurio está muy adherido a materiales absorbentes no puede pasar fácilmente al flujo sanguíneo).
- El transporte dentro del organismo hacia los tejidos en los que tiene efectos tóxicos.
- Su acumulación, biomodificación, destoxificación en tejidos, así como su excreción;
- Su biomagnificación en la cadena alimentaria (caso del metilmercurio) [27].

El tipo de especie también incide en el transporte del mercurio dentro de cada compartimiento ambiental, como en la atmósfera y los océanos. Por ejemplo, la especiación es un factor determinante para la distancia que recorre el mercurio emitido en el aire desde su fuente de emisión. El mercurio adsorbido en partículas y compuestos de mercurio iónico se deposita sobre todo en el suelo y el agua cercana a las fuentes, mientras que el vapor de mercurio elemental se transporta a escala hemisférica mundial, lo que hace de las emisiones de mercurio una preocupación de alcance global. Otro ejemplo es la llamada "incidencia de reducción del mercurio en el amanecer polar", cuando se presenta una transformación de mercurio elemental en mercurio divalente debido a una mayor actividad solar y a la presencia de cristales de hielo, con lo que se observa un incremento sustancial en la deposición del mercurio durante el periodo de marzo a junio aproximadamente [28].

II.3 El mercurio y su transformación en la atmósfera

La química atmosférica del mercurio implica diversas interacciones:

- Reacciones en fase gaseosa.
- Reacciones en fase acuosa (en gotitas de niebla y nubes, y partículas de aerosol delicuescentes).
- Repartición de las especies de mercurio elemental y oxidado entre las fases gaseosa y sólida.
- Repartición entre las fases gaseosa y sólida.
- Repartición entre las fases sólida y acuosa en el caso de materia particulada insoluble recogida por las gotitas de agua de la niebla o las nubes [29].

La acción recíproca entre los procesos atmosféricos y la química del mercurio se describe en la Figura II.2. La especiación atmosférica cumple una importante función en el transporte de mercurio a larga distancia, así como en los mecanismos de deposición.

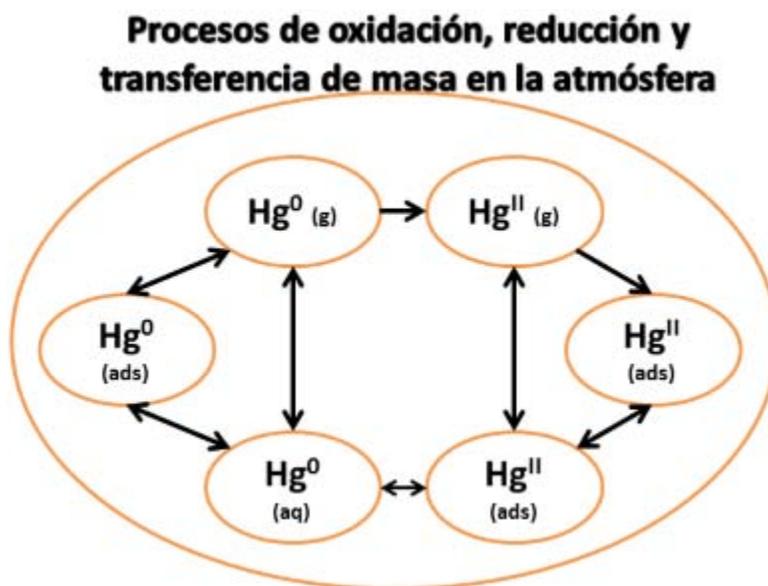


Figura II.2 Modelo de las interacciones entre las especies de mercurio en la atmósfera (Pirrone 2001).

En la determinación de la constante de velocidad de reacción del $\text{Hg}^0 + \text{OH}$ (radical hidroxilo) en la fase gaseosa y la medición de la constante de velocidad de átomos de Hg^+ han mostrado que la oxidación del mercurio elemental (que antes se pensaba que ocurría sobre todo en la fase acuosa y sólo muy lentamente en la fase gaseosa como resultado de la reacción con el O_3) ocurre de manera rápida y las estimaciones de la vida atmosférica del mercurio elemental se han tenido que reducir de alrededor de un año a cuestión de meses. La tasa de oxidación del mercurio elemental es fundamental para la química del mercurio atmosférico porque los compuestos de mercurio oxidado (como HgO y HgCl_2) que se producen son más solubles (y, por lo tanto, son recogidos con mayor rapidez por las nubes), menos volátiles (y, por lo tanto, recogidos con mayor rapidez por las partículas) y tienen una mayor velocidad de deposición [30].

La química troposférica del mercurio se ha discutido mucho en los últimos cuatro o cinco años desde la publicación de los resultados de mediciones a largo plazo efectuadas en el Ártico. Los resultados con la oxidación de Hg^0 en fase gaseosa, probablemente por átomos de halógenos o radicales que contienen halógenos y la condensación subsiguiente en partículas o deposición en la reserva de nieve acumulada. Naturalmente, este fenómeno ha causado preocupación por los efectos toxicológicos que van en aumento [31].

La mayor parte de las emisiones provenientes de la quema de combustibles tienen lugar en la fase gaseosa. La combustión, del mercurio contenido en el carbón y otros combustibles fósiles lo convierte en su forma elemental. La forma oxidada puede ser retenida en los sistemas modernos de limpieza de gases de combustión. Los incineradores de residuos generan emisiones de mercurio en un proceso similar, pero se supone que producen una mayor cantidad de la forma oxidada porque los residuos contienen más cloro que los combustibles fósiles [32].

II.4 El mercurio y su transformación en medios acuáticos

El metilmercurio se puede formar en el medio ambiente por metabolismo microbiano (procesos bióticos); por efecto de ciertas bacterias, así como por procesos químicos que no implican a organismos vivos (procesos abióticos). Una gran variedad de factores ambientales influyen en la formación de metilmercurio en los sistemas acuáticos. La eficiencia de la metilación microbiana del mercurio en general depende de factores tales como la actividad microbiana y la concentración de mercurio biodisponible, en los que a la vez inciden parámetros tales como la temperatura, el pH, el potencial redox y la presencia de agentes complejantes orgánicos e inorgánicos [33].

El metilmercurio es la especie de mercurio que predomina en los peces. En un estudio general sobre el mercurio, la EPA (Agencia de protección ambiental de USA) afirma que en la mayoría de los peces adultos, entre 90 a 100% del contenido de ese metal se encuentra en forma de metilmercurio. En consecuencia, la EPA recomienda que en la evaluación del riesgo de consumir pescado se considere que el 100% del mercurio presente pueda estar en forma de metilmercurio, a fin de proteger al máximo la salud humana [34].

Mason y Fitzgerald (1996; 1997) han examinado aspectos del ciclo del mercurio en océanos y otras masas de agua. Según estudios sobre aguas oceánicas abiertas, es evidente que el mercurio elemental, el dimetilmercurio y, en menor grado, el metilmercurio son constituyentes comunes del depósito de mercurio disuelto de las aguas oceánicas profundas. En las aguas abiertas superficiales de los océanos, no hay dimetilmercurio, quizá porque se descompone en presencia de la luz y, además, porque posiblemente se evapore de la superficie del agua [35].

Estudios realizados han mostrado que la metilación del mercurio tiene lugar principalmente en condiciones de baja concentración de oxígeno y la realizan principalmente bacterias reductoras de sulfatos. En ese caso, el metilmercurio es el producto de la metilación de mercurio iónico. La Figura II.3 muestra un diagrama de las principales reacciones del mercurio en el océano [36].

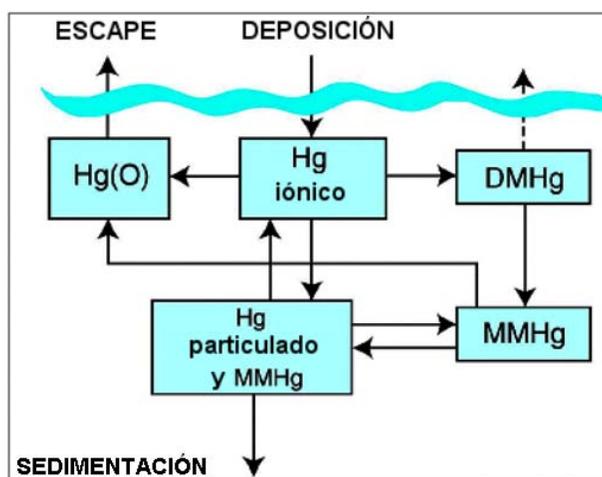


Figura II.3 Interacciones entre las diversas especies de mercurio en aguas oceánicas Hg(O) = mercurio elemental, DMHg = dimetilmercurio, MMHg = (mono)metilmercurio.

II.5 El mercurio y su transformación en suelos

El mercurio raramente se encuentra libre en la naturaleza. El cinabrio (HgS) es el mineral más importante para obtención de mercurio. Otros minerales de mercurio son el calomelano o mercurio córneo (Hg₂Cl₂), la tiemannita, (HgSe) y la coloradoita (HgTe). Las áreas geológicas enriquecidas con mercurio están relacionadas con los límites de placas, vulcanismo reciente, mineralizaciones de metales preciosos y altos flujos de calor. En la mayoría de los yacimientos de mercurio existe una asociación con fallas y fracturas regionales [37].

Los suelos terrestres representan un gran almacén de mercurio y la especiación de mercurio es predominantemente dominado por especies de Hg(II). Las condiciones del suelo (pH, temperatura, contenido en ácido húmico, etc.) son normalmente favorables para la formación de compuestos inorgánicos de Hg(II) como cloruro mercúrico (HgCl_2), hidróxido de mercurio ($\text{Hg}(\text{OH})_2$) y compuestos inorgánicos de Hg(II) complejados con aniones orgánicos. Las formas menos reactivas de mercurio en el suelo son el sulfuro mercúrico (HgS) y el óxido mercúrico HgO , con una menor tendencia a la metilación que las anteriores. Los compuestos inorgánicos de Hg^{2+} suelen formar complejos con la materia orgánica (ácidos húmicos y fúlvicos) y los minerales de arcilla; este comportamiento limita en gran medida la movilidad del mercurio en suelos. Sin embargo, una parte del Hg(II) puede ser adsorbido por ligandos orgánicos solubles u otras formas de carbono orgánico disuelto, facilitando la partición del mercurio hacia la fase acuosa. El metilmercurio es otra especie de mercurio presente en proporciones muy pequeñas en suelos, pero de gran importancia debido a su toxicidad y capacidad para la bioacumulación. Su proporción media respecto al total de mercurio presente en suelos suele ser inferior al 1% y presenta una gran afinidad por la materia orgánica, limitando su movilidad en el ambiente [38].

El mercurio que se deposita en el componente terrestre proveniente de la atmósfera es rápidamente adsorbido por las plantas y la capa de humus del suelo y en segundo término por los constituyentes minerales. Las plantas absorben únicamente la fracción de mercurio que se encuentra en disolución, aunque ésta se encuentra en equilibrio con la fracción de mercurio retenida en los constituyentes del suelo con menor fuerza. La retención de este metal en el suelo ocurre principalmente por adsorción a través de materia orgánica, minerales de arcilla y óxidos de manganeso y hierro. En suelos y sedimentos, el mercurio probablemente está asociado con la materia orgánica y óxidos de hierro bajo condiciones de oxidación, mientras que en condiciones de reducción se relaciona con la materia orgánica y sulfuros [39].

CAPÍTULO III

FUENTES DE EMISIÓN Y USOS.

III.1 Fuentes naturales de Hg

Las fuentes naturales de mercurio provienen de las actividades volcánicas, la evaporación de superficies terrestres y acuáticas, la degradación de minerales y los incendios forestales. Se puede encontrar mercurio en concentraciones pequeñas, pero variables, en prácticamente todos los medios geológicos. De hecho, constantemente está llegando a la atmósfera mercurio elemental y algunas formas de mercurio oxidado, a causa de las altas temperaturas del manto terrestre, así mismo tiene una gran movilidad y se difunde continuamente hacia la superficie se sabe que en las zonas de fracturas geológicas profundas, los procesos de movilidad tienen mayor intensidad. Allí se encuentran los llamados cinturones geoquímicos, en cuya capa superior las concentraciones de metal son relativamente altos. En algunas partes de esos cinturones, la gran acumulación de mercurio condujo a la formación de depósitos [40].

Desde hace varias décadas se han intentado estimar las emisiones naturales de mercurio, ya sea a escala local, regional y mundial. Sin embargo, ha sido difícil hacerlo con precisión y varias organizaciones todavía continúan las investigaciones en este campo. Por esto, es necesario no perder de vista estas fuentes, pues contribuyen a los niveles ambientales de mercurio [41].

Gracias a los continuos estudios que se realizan sobre las liberaciones procedentes de diversas fuentes, los flujos a la superficie de la tierra y la magnitud de los depósitos que se han acumulado en suelos, cuencas y océanos, se ha mejorado el conocimiento acerca del ciclo del mercurio a lo largo de los años. Aunque, todavía existe una gran incertidumbre, cada vez es más evidente que las emisiones antropogénicas de mercurio al aire superan a las aportaciones naturales. Según estimaciones recientes, las cantidades de mercurio liberadas al aire por las actividades humanas constituyen entre el 70 y el 75% de la aportación total anual a la atmósfera de todas las fuentes (figura III.1) [42].

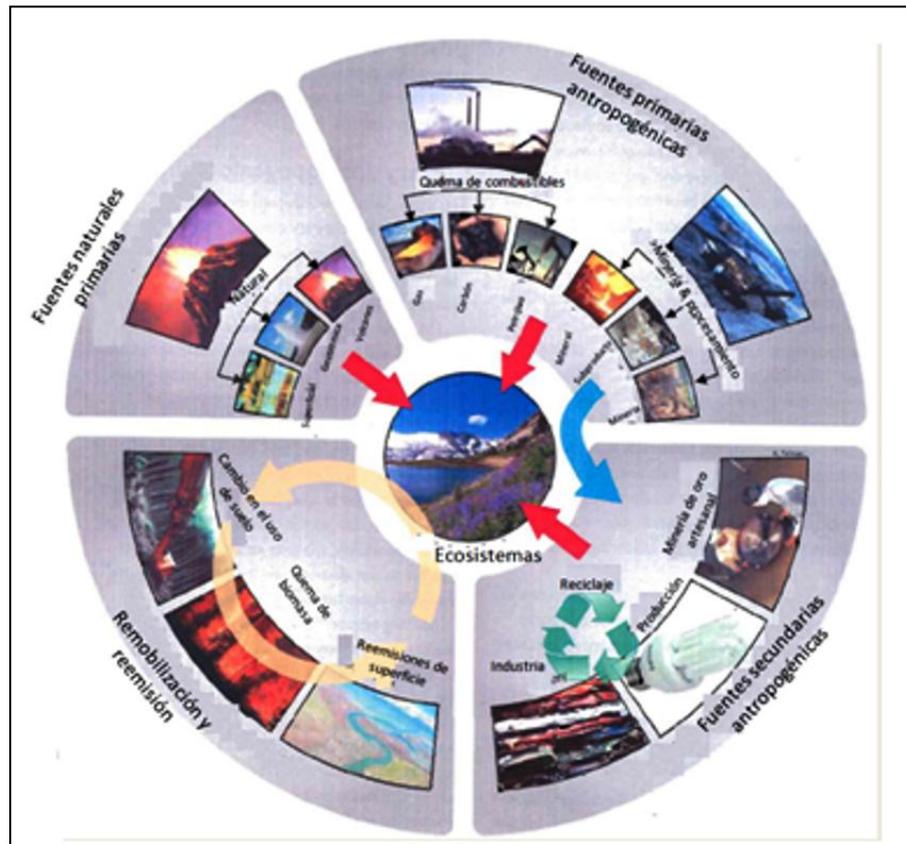


Figura III.1 Principales fuentes de emisión de mercurio (UNEP 2008).

III.2 Fuentes antropogénicas.

Una gran parte del mercurio que ahora está presente en la atmósfera es producto de muchos años de liberaciones provenientes de actividades antropogénicas.

1) Liberaciones por la movilización de impurezas de mercurio:

- Producción de energía a basada en combustibles fósiles.
- Producción de cemento.
- Minería y otras actividades metalúrgicas que comprenden la extracción y elaboración de materiales minerales vírgenes y reciclados.

2) Liberaciones de la extracción y el uso intencional del mercurio:

- Minería del mercurio.
- Minería del oro y la plata en pequeña escala (proceso de amalgamación).
- Proceso de cloro-álcali.

- Uso de lámparas fluorescentes, diversos instrumentos y amalgamas dentales.
- Fabricación de productos que contienen mercurio (termómetros, baterías y cosméticos).

3) Liberaciones a través del tratamiento de residuos.

- Incineración de residuos (municipales y peligrosos).
- Vertederos de residuos sólidos urbanos.
- Hornos crematorios.
- Cementerios (liberaciones al suelo) [44].

En el ciclo del mercurio intervienen una variedad de fuentes y procesos complejos de transporte y movilización del mercurio (ver Figura III.2). Se estima que un 30% de las emisiones actuales a la atmósfera son de origen antropogénico (unas 2000 toneladas), mientras que un 10% proceden de fuentes naturales y el resto (70%) proviene de “re-emisiones” de mercurio depositado y acumulado históricamente en los suelos y los océanos [40].

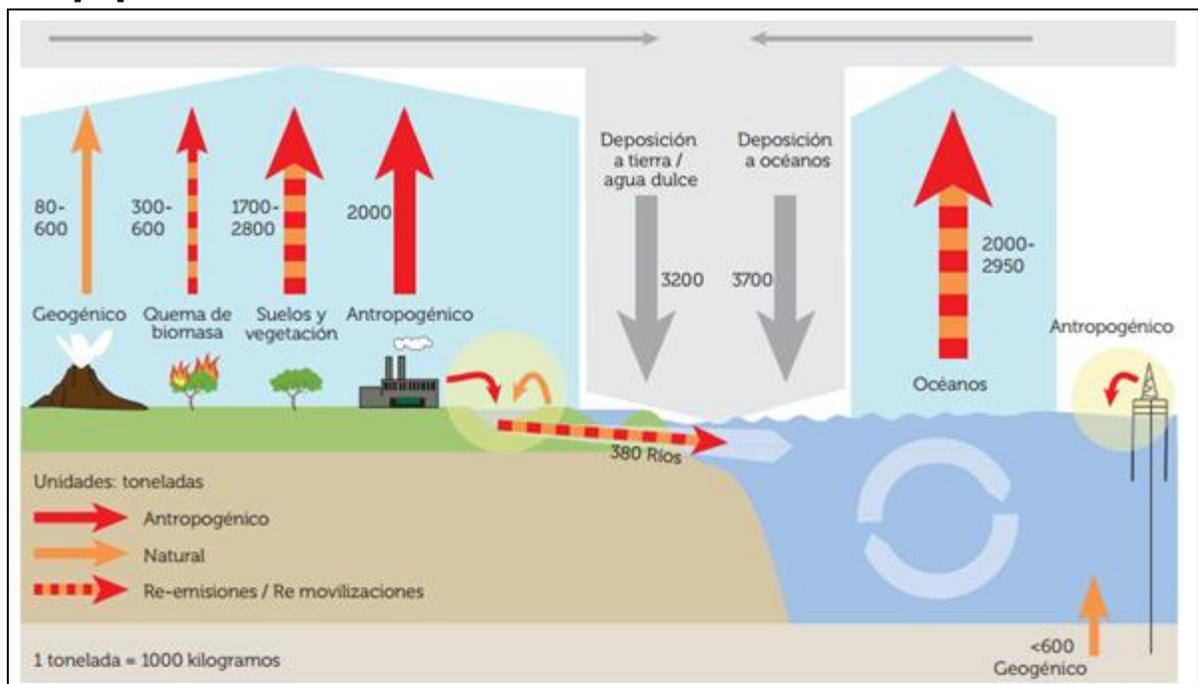


Figura III.2 Fuentes de generación de mercurio (UNEP 2013).

A nivel mundial, se estimó que en el año 2010 la deposición atmosférica de mercurio fue de 3,200 toneladas/año a la tierra y 3,700 toneladas/año a los océanos. Sin embargo, una gran parte del mercurio depositado, tanto en la tierra como en los océanos, es re-emitido a la atmósfera. Un porcentaje del mercurio liberado al medio acuático es convertido por microorganismos a metilmercurio (MeHg), que es más tóxico y biodisponible que el mercurio elemental (Hg), quedando en ese medio para su acumulación y biomagnificación en las cadenas tróficas acuáticas y terrestres [40].

Aproximadamente el 80% del mercurio que es liberado a la atmósfera por actividades humanas en su forma elemental proviene principalmente como consecuencia del uso de combustibles fósiles, la minería, fundiciones y de la incineración de desechos sólidos. Cerca del 15% del total se libera al suelo y proviene de abonos, fungicidas y desecho sólido municipal (por ejemplo, de basura que contiene baterías, interruptores eléctricos o termómetros). Un 5% adicional es liberado al ambiental desde aguas residuales industriales [45].

III.3 Usos del mercurio

El mercurio metálico se usa en interruptores eléctricos como material líquido de contacto; como fluido de trabajo en bombas de difusión en técnicas de vacío; en la fabricación de espejos, termómetros, barómetros, tacómetros, termostatos y lámparas de bajo consumo; en el curtido y tratamiento flexibilizante de las pieles y fabricación de fieltros; en la recuperación de metales preciosos en yacimientos mineros; en la producción de ácido acético y acetaldehído a partir de acetileno; en la taxidermia; en la fotografía y el fotograbado; en algunas pinturas y pigmentos; en la electrodeposición del oro, la plata, el bronce y el estaño; en el control fitosanitario (dicloruro de mercurio; fenilacetato de mercurio) y en la fabricación de seda artificial, así como en la industria farmacéutica y en la práctica odontológica.

Los electrodos normales de calomel son importantes en electroquímica; se usan de referencia en la medición de potenciales, en titulaciones potenciométricas y en la celda normal de Weston (patrones para medición de voltaje).

Se utilizan compuestos de mercurio a nivel doméstico (Figura III.3) tales como cosméticos, cremas, productos para el cabello, y en ciertas prácticas religiosas (espiritismo, santería) y de medicina folklórica. Otro uso del mercurio es en la denominada lámpara de vapor de mercurio como fuente de luz ultravioleta o esterilizador de agua, así como iluminación pública.

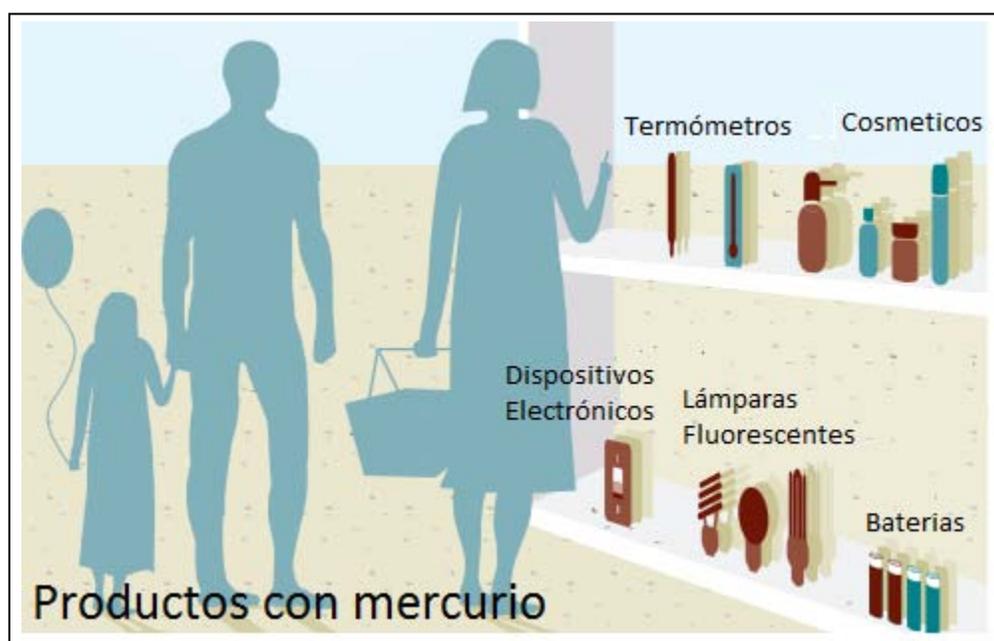


Figura III.3 Uso domestico mercurio (UNEP, Mercury Awareness Raising Package September) 2012.

También se ha utilizado como explosivo, para la preparación de mezclas detonantes (fulminato de mercurio), en la producción de pasta de papel, y en dactiloscopia.

Los antisépticos locales, incluían sales inorgánicas solubles e ionizables (biclóruo de mercurio); compuestos inorgánicos insolubles (óxido mercúrico amarillo y mercurio amoniaco) y compuestos mercuriales orgánicos sintéticos, como el Thimerosal (tiosalicilato sódico de etilmercurio, Merthiolate) o el Nitromersol. Todos estos

compuestos son bacteriostáticos (impiden el desarrollo y crecimiento de colonias bacterianas) por la acción que el mercurio tiene de precipitar proteínas.

Se utiliza en productos para humanos y en medicina veterinaria en las formas de thimerosal, acetato de fenilmercurio, nitrato de fenilmercurio, acetato de mercurio, nitrato de mercurio, merbromina y oxido amarillo de mercurio. En productos formulaciones oftalmológicas, ópticas, desinfectantes dérmicos, descongestivos nasales, antihemorroidales, acompañando a medicación antihistamínica, corticoides, antivirales, antimicóticos o antibióticos, que se presentan en ungüentos, lociones, gotas, spray. En la Figura III.4, se puede observar la demanda de mercurio requerida por diferentes procesos industriales en toneladas por año.

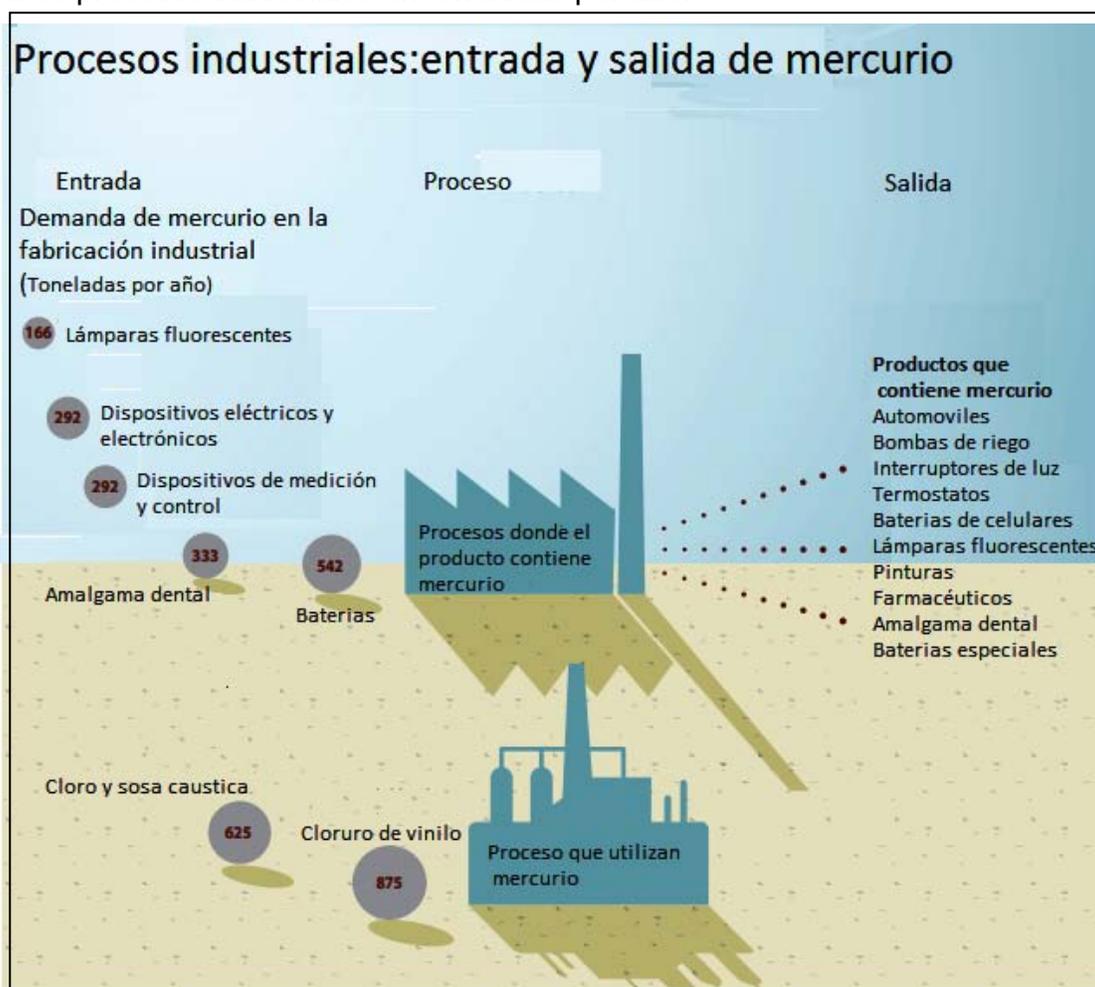


Figura III.4 Balance de entrada y salida de mercurio para diferentes usos (UNEP, 2008).

CAPÍTULO IV TOXICOLOGÍA EFECTOS A LA SALUD Y AMBIENTE.

IV.1 El mercurio y sus efectos tóxicos

Las personas pueden estar expuestas a vapor de mercurio, a sus sales inorgánicas y compuestos orgánicos; cada estado de oxidación, así como cada especie química, da lugar a efectos específicos sobre la salud (Tabla IV.1) [47]. Esta exposición puede ser:

Tabla IV.1. Tipos de exposición

Tipo de exposición	Ejemplos
Consumo de alimentos	Consumo de pescados o mariscos contaminados con metilmercurio.
Ocupacional	Minería del oro; industrias y plantas de extracción de recursos naturales; laboratorios, etc.
Accidental	Liberación de vapores de mercurio metálico por accidentes con artefactos o instrumentos que lo contienen.
Iatrogénica	A partir de prácticas médicas u odontológicas.

Las vías de ingreso del mercurio al organismo son cutánea, respiratoria, parenteral y por ingestión digestiva. Además de los datos de concentración y tiempo, son factores (biológicos) a tener en cuenta en la exposición: edad, género, estado fisiológico, masa corporal, estado de nutrición, enfermedades preexistentes [46].

Las fuentes de exposición también varían notablemente de una a otra forma de mercurio. En cuanto a los compuestos orgánicos mercuriales, de los cuales el metilmercurio es el más importante, la fuente de exposición más significativa es la alimentación, particularmente la dieta a base de pescados y mariscos. En el caso del vapor de mercurio elemental, la fuente más importante para la población en general son las amalgamas dentales, pero a veces la exposición en el ambiente de trabajo puede ser mayor. En lo que respecta a compuestos inorgánicos de mercurio, el consumo de alimentos contaminados constituye la fuente más importante. Sin embargo, para ciertos segmentos de la población, el uso de cremas y jabones a base de mercurio para aclarar la piel, y el uso de mercurio con propósitos tradicionales, también puede conducir a la

exposición a mercurio inorgánico o elemental [48].

IV.2 Efectos sistémico del mercurio

El metilmercurio es un neurotóxico que puede provocar efectos perjudiciales particularmente en el cerebro en formación. Además, este compuesto traspasa con facilidad la barrera placentaria y la barrera hematoencefálica;. Así mismo, algunos estudios indican que incluso un pequeño aumento en la exposición al metilmercurio puede causar efectos perjudiciales en el sistema cardiovascular y un incremento en la mortalidad [49].

La vía principal de exposición al mercurio elemental es por inhalación de sus vapores. Cerca del 80% de los vapores inhalados es absorbido por los tejidos pulmonares [50].

La absorción intestinal de mercurio elemental es baja, aunque éste puede oxidarse en los tejidos corporales a su forma divalente inorgánica. Se han observado trastornos neurológicos y de comportamiento en seres humanos tras la inhalación de vapor de mercurio elemental. Algunos de los síntomas son: temblores, labilidad emocional, insomnio, pérdida de la memoria, cambios en el sistema neuromuscular y dolores de cabeza. Así mismo se han observado efectos en el riñón y la tiroides. Las exposiciones altas también han ocasionado mortalidad (figura IV.1).

Puede haber otras contribuciones considerables a la ingesta de mercurio total vía aire y agua, según la carga local de contaminación. Asimismo, el uso del mercurio para actos y rituales religiosos y culturales, aplicaciones en medicamentos tradicionales (por ejemplo en algunos remedios tradicionales de Asia) y el mercurio en hogares y lugares de trabajo pueden aumentar sustancialmente la exposición humana. Además, se han observado niveles elevados de mercurio en ambientes de trabajo como en plantas de cloro-álcali, minas de mercurio, fábricas de termómetros, refinerías y clínicas dentales así como en la minería y elaboración de oro extraído con mercurio. [40].

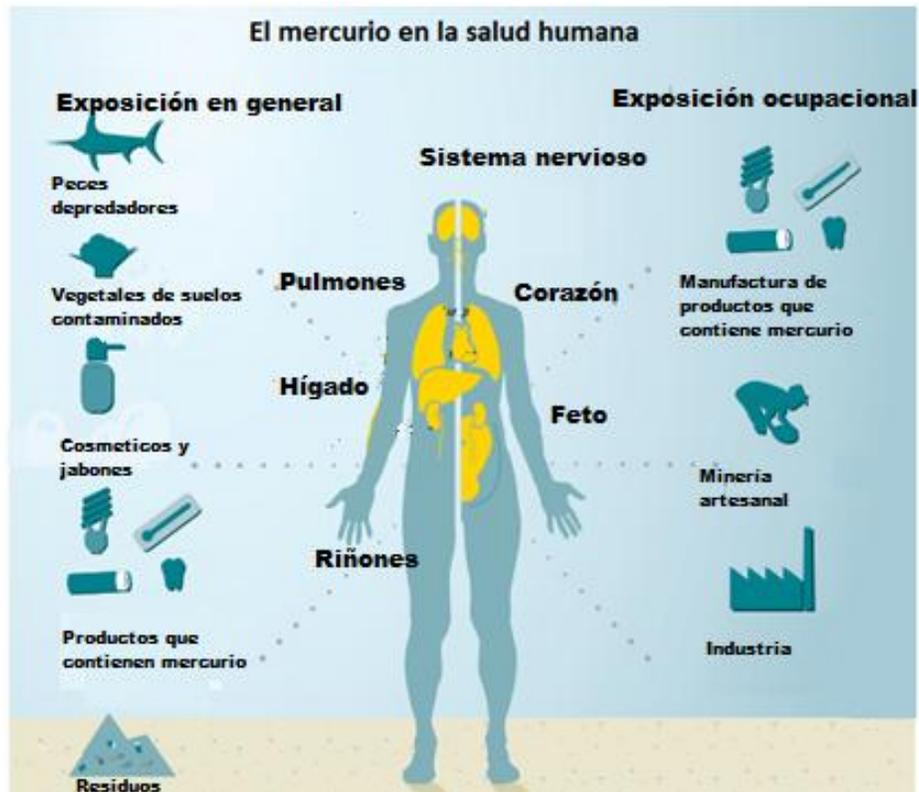


Figura IV.1 El mercurio en la salud humana (UNEP 2013)

IV.3 Efectos al ambiente

Un factor muy importante de los efectos del mercurio en el ambiente es su capacidad para acumularse en organismos y ascender por la cadena alimentaria. Hasta cierto punto, todas las formas de mercurio pueden llegar a acumularse, pero el metilmercurio se absorbe y acumula más que otras formas. La biomagnificación del mercurio es lo que más incide en los efectos para animales y seres humanos. Al parecer, los peces adhieren con fuerza el metilmercurio; casi el 100% del mercurio que se bioacumula en peces depredadores es metilmercurio. La mayor parte del metilmercurio en tejidos de peces forma enlaces covalentes con grupos sulfhidrido proteínico, con lo que la vida media de eliminación resulta larga (aproximadamente de dos años). Como consecuencia, se genera un enriquecimiento selectivo de metilmercurio (en comparación con el mercurio inorgánico) cuando se pasa de un nivel trófico al siguiente nivel trófico superior [51].

En resumen es necesario diferenciar entre bioacumulación y biomagnificación las definiciones son las siguientes:

El término bioacumulación significa la acumulación neta en un organismo de metales provenientes de fuentes bióticas (otros organismos) o abióticas (suelo, aire y agua).

El término biomagnificación significa la acumulación progresiva de ciertos metales pesados (y otras sustancias persistentes) de uno a otro nivel trófico sucesivo. Está relacionada con el coeficiente de concentración en los tejidos de un organismo depredador en comparación con el de su presa.

Se sabe que aguas superficiales ácidas pueden contener significantes cantidades de mercurio. Cuando los valores de pH están entre cinco y siete, las concentraciones de mercurio en el agua se incrementarán debido a la movilización del mercurio en el suelo, con el riesgo que los microorganismos puedan convertirlo en metil mercurio.[52].

En la superficie terrestre, el mercurio que se acumula en el suelo es degradado por microorganismos (biometilación) o se oxida formando Hg^{2+} . La metilación produce metilmercurio que escapa a la atmósfera y se descompone formando mercurio elemental; éste es arrastrado por las precipitaciones esta ruta se presenta en la Figura IV.2 [53].

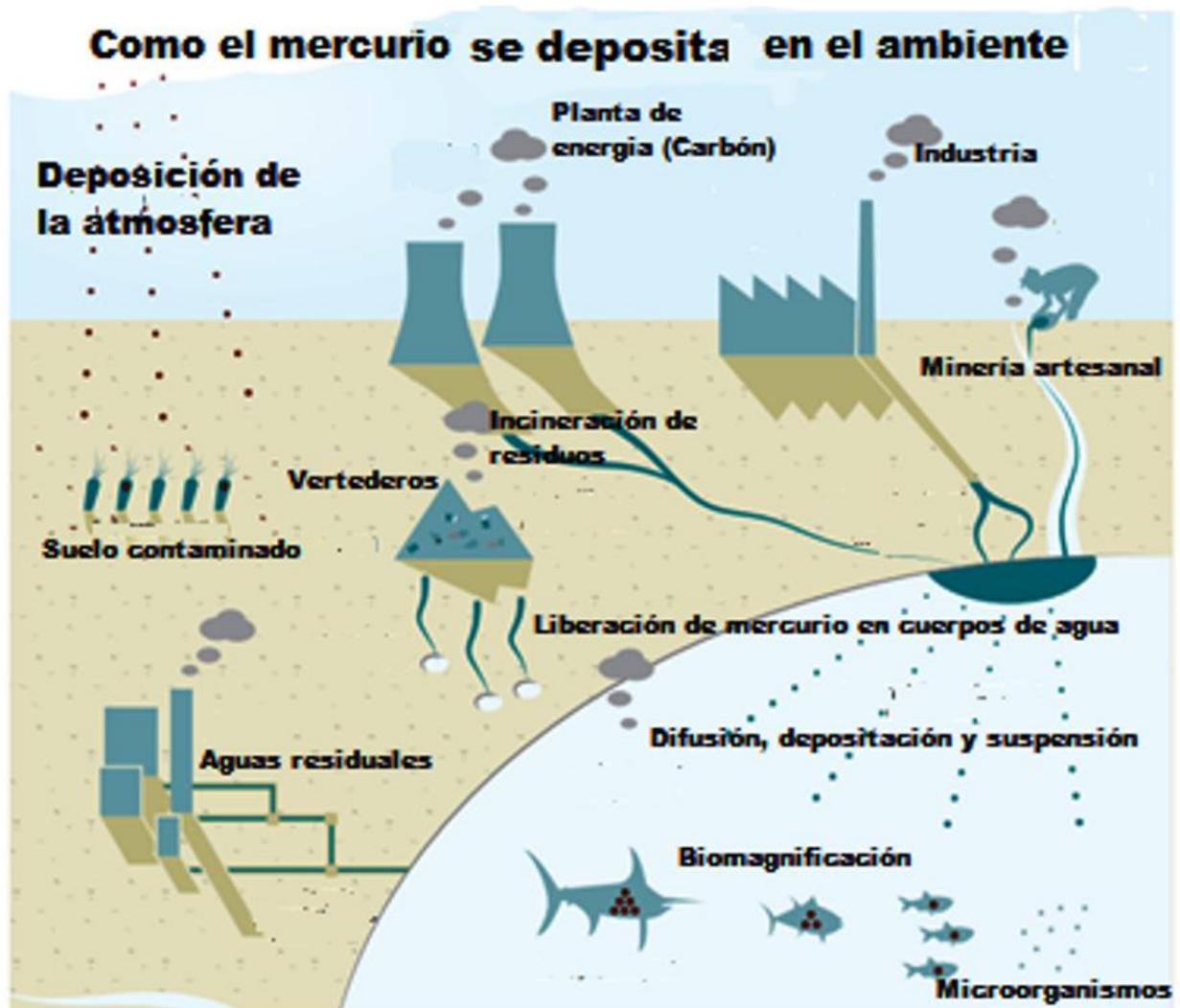


Figura IV.2 Como el mercurio se deposita en el ambiente (UNEP 2013)

A escala mundial, la región del Ártico ha atraído recientemente la atención debido a la particular tendencia del mercurio a transportarse a larga distancia. Es importante reconocer, sin embargo, que los efectos del mercurio no son en absoluto exclusivos de la región ártica. Las mismas características de la cadena alimentaria y una dependencia similar de fuentes de alimentos contaminadas por mercurio se observan en determinados ecosistemas y comunidades humanas de muchos países del mundo, en particular aquellos en que predomina la alimentación a base de pescado. Por consiguiente, los mamíferos y aves que consumen pescado están más expuestos al mercurio que cualquier otro habitante del ecosistema acuático. Los sedimentos árticos

contienen concentraciones cada vez más altas de mercurio y hay pruebas de que la concentración en algunos mamíferos marinos ha aumentado de dos a cuatro veces durante los últimos 25 años en algunas zonas del Ártico canadiense y Groenlandia.

A menudo el Ártico es objeto de atención especial por el riesgo que representa el mercurio para los ecosistemas y los efectos que este metal tiene en las poblaciones humana, ya que, la cadena alimentaria acuática es muy larga y tiene tres niveles de depredadores en la parte superior (incluyendo a los seres humanos), en que el mercurio se concentra por biomagnificación [54].

Grandes cantidades de mercurio son liberadas en las aguas del Amazonas y en el aire de vastas zonas de extracción de oro, donde se utiliza el mercurio para amalgamar el precioso metal. El impacto de esas actividades se extiende a zonas más alejadas y se hace sentir, por ejemplo, en los humedales del Pantanal en el oeste de Brasil, y en partes de Bolivia y Paraguay. La deposición del mercurio después actividades de extracción del oro fue más de 1,5 veces superior a la tasa de deposición en el sitio de referencia de Acurizal, lo cual confirmó los efectos regionales del mercurio ocasionados por la minería del oro. La acumulación de mercurio en Acurizal tras la corrida en años pasados también fue 2,1 veces superior a la tasa dada como referencia mundial en ese período, lo cual sugiere un efecto adicional en esos sitios de referencia que abarca toda la cuenca. Se calculan que solamente del 2 al 8% del mercurio total liberado por la minería de oro se fijó en los sedimentos. El resto del mercurio se dispersó en la atmósfera o en zonas corriente abajo, o bien quedó almacenado en la biota [55].

CAPÍTULO V

ANTECEDENTES DEL MERCURIO COMO CONTAMINANTE GLOBAL Y LEGISLACIÓN

V.1 Eventos históricos que marcaron al mercurio como contaminante

Se considera que el mercurio representa una cuestión político-ecológica donde impacta el cambio climático; calidad y suministro del agua; bosques y biodiversidad; tierra y seguridad alimentaria; recursos minerales y agotamiento energético; y contaminación tóxica, formando parte de las seis principales prioridades ecológicas globales dentro de la categoría de las sustancias tóxicas [56].

A partir de actividades especialmente relacionadas con la agricultura y la minería, se han efectuado episodios de contaminación de ambientes o alimentos para consumo humano. Algunos de estos eventos y se consideraron verdaderas catástrofes por su magnitud, impacto o permanencia en el tiempo. Algunos ejemplos de eventos en los que ha intervenido el mercurio se muestran en la Tabla V.1:

Tabla V.1 Catástrofes mundiales.

Productos de mercurio	Producto Contaminado	País	Personas afectadas	Muertes	Año
Etilmercurio	Trigo	Irak	200	70	1955
Etilmercurio	Trigo	Irak	1000	200	1959
Etilfenilmercurio	Trigo	Pakistán	100	9	1961
Metilmercurio	Trigo	Guatemala	45	20	1966
Etilmercurio	Maíz	Ghana	144	20	1967
Metilmercurio	Trigo	Irak	6530	459	1971
Metilmercurio	Pescados y mariscos	Japón	Se desconoce	Se desconoce	1956

(Bang 2007)

V.1.1 Evento en Irak

Entre 1971 y 1972 más de 6.000 personas y decenas de miles sufrieron graves consecuencias residuales debido a un envenenamiento originado en semillas de trigo y cebada contaminadas importadas desde México y EE.UU.

Los granos importados habían sido expuestos a metilmercurio y la advertencia en cada saco sobre la prohibición de utilizar estos granos como consumo estaba rotulada en inglés y en castellano. Los granos fueron distribuidos entre los agricultores quienes, ante el apremio de la hambruna, utilizaron parte para preparar alimentos; el desconocimiento del significado de los rótulos por razones idiomáticas y las dificultades gubernamentales para difundir masivamente una advertencia. Tres meses después de haberse iniciado la distribución, los casos de envenenamiento seguido de muerte se multiplicaron en el interior del país; la crisis se agudizó al constatarse que la contaminación se había extendido al ganado haciendo del consumo de carne contaminada de bovinos una nueva e imprevista vía de propagación [57].

V.1.2 Evento en Japón

La llamada enfermedad de Minamata, producida por el consumo de pescado y mariscos contaminados con metilmercurio, se debe a la producción de este por bacterias presentes en el agua y su posterior liberación en el medio acuático. Esta metilación bacteriana, que convierte al mercurio metálico en compuesto orgánico (liposoluble, capaz de atravesar barreras biológicas con facilidad), es el mecanismo a través del cual el Hg queda disponible para ingresar en la cadena alimentaria ya que el consumo de pescado era la dieta principal de los pobladores de la bahía.

En el caso de la Bahía de Minamata, Japón - en la que la compañía química Chisso, descargó entre 1932 y 1968, aproximadamente 27 toneladas de compuestos con mercurio este mecanismo movilizó el metal almacenado en los sedimentos de la bahía y lo convirtió en su forma disponible para las personas a través del pescado contaminado. “Minamata” fue la primera referencia conocida de enfermedad fetal debida al metilmercurio y la primera descripción completa de su neurotoxicidad [58].

Los síntomas incluyen alteraciones graves del equilibrio, de la sensibilidad en manos y pies, deterioro de los sentidos de la vista y el oído, debilidad generalizada y, en casos extremos, parálisis y muerte. En 1956 año en que se detectó un brote, murieron 46 personas.

En la década de los 60s se habían identificado ya 111 víctimas mortales, sumadas a los más de 400 casos con problemas neurológicos graves. Madres que no presentaron ningún síntoma preocupante durante su embarazo dieron a luz niños gravemente enfermos.

En 1968, el gobierno japonés anunció oficialmente que la causa de la enfermedad era la ingestión de pescados y mariscos contaminados con mercurio por los vertidos de la empresa petroquímica Chisso. Hasta el 2001 se habían diagnosticado en Japón 2,955 casos de la enfermedad de Minamata. De ellos, 2,265 habían vivido en la zona gravemente contaminada [58].

Línea del tiempo de eventos de Minamata

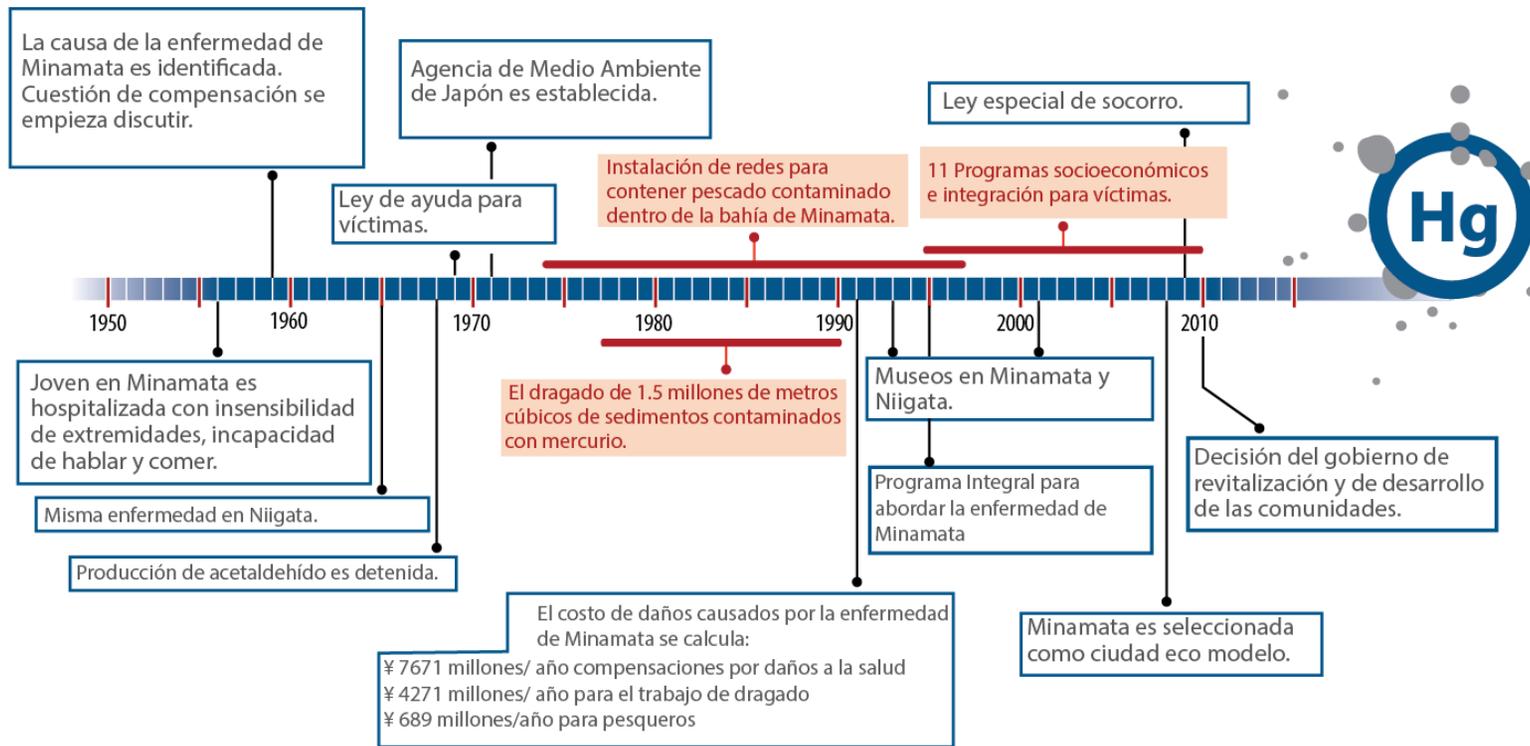


Figura V.1 Línea de tiempo de eventos de Minamata (UNEP).

V.1.3 Evento en Perú

La mina de Yanacocha es la mayor y más importante mina de oro en América Latina. En los primeros días de junio del 2000, un camión de la empresa Newmont (que explota el yacimiento minero, en las cercanías de Cajamarca) derramó en Choropampa, en las inmediaciones de la mina, 150 kilogramos de mercurio a lo largo de varios kilómetros. Los pobladores, pensando que el mercurio contenía oro, lo recogieron; algunos de ellos incluso lo llevaron a sus casas. 72 horas después, aparecen los primeros casos de intoxicación en pobladores. Para fines del mes de julio se habían identificado aproximadamente 67 hogares con rastros de contaminación ambiental por mercurio [59].

V.1.4 Eventos en Amazonas

La Cuenca del Amazonas es una de las más afectadas por procesos de extracción artesanal de oro. Miles de mineros independientes que realizan trabajo no regulado - conocidos como “garimpeiros” utilizan un proceso artesanal que consiste en mezclar mercurio en su estado elemental con los sedimentos del río, para separar las trazas de mineral de oro que existen en esté.

La minería de pequeña escala o artesanal, concentrada en su mayoría en los países del Hemisferio Sur, afecta las vidas de 80 a 100 millones de personas. En 1958 el descubrimiento de oro en el río Tapajós, en Brasil, desplazó a más de 200,000 personas hacia un área virgen con carencia absoluta de infraestructura habitacional y sanitaria.

Según estudios científicos realizados llevados conjuntamente por universidades de Brasil y Canadá en la zona extractiva, identificaron el mercurio que fue usado en la extracción presente en el suelo, en los sedimentos fluviales, en todos los peces del cuerpo de agua y las muestras tomadas por el grupo de investigación así mismo se hicieron análisis en la población en las cercanías del río.

La deforestación masiva de la zona pone en riesgo nuevamente la movilización de mercurio dispersado en el suelo de hace cientos de años de esta actividad. Resultados de un seguimiento en personas expuestas demostraron una reducción en la destreza manual y en ciertas funciones visuales, así como en la habilidad de distinguir líneas contrastantes, que estaban asociadas con un incremento de los niveles de mercurio en cabello. "Estamos observando cambios en el sistema nervioso a niveles de exposición relativamente bajos.

El equipo de investigación pudo comprobar también que las funciones motora y visual se veían perturbadas a niveles de exposición mucho menores de los que se consideraban.

El estudio del río Tapajós parece ser uno de los primeros en demostrar tan claramente los efectos nocivos de exposición a bajos niveles de mercurio y está contribuyendo a continuar con discusiones internacionales sobre la necesidad de reducir el umbral establecido por la OMS [60].

V.2 Antecedentes Convenio de Minamata

Como respuesta a la preocupación internacional sobre el mercurio derivado de los eventos históricos de contaminación, y a instancias del entonces Consejo de Administración del PNUMA, se publicó en el año 2002 la primera evaluación mundial sobre el mercurio y sus compuestos, en cooperación con otros miembros del Programa Interinstitucional para la Gestión Racional de las Sustancias Químicas. Como resultado de esta evaluación, el Consejo de Administración acordó que se requería una mayor acción internacional para reducir los riesgos sobre la salud y el ambiente [61].

Una de las principales acciones que se llevaron a cabo fue la creación en 2005 de la Asociación Mundial sobre el Mercurio del PNUMA. La Asociación incluye actualmente ocho áreas prioritarias, que responden a los siguientes compromisos:

- La reducción del uso de mercurio en la extracción de oro artesanal y en pequeña escala.

- Control del mercurio emitido en la combustión del carbón.
- Reducción de mercurio en el sector cloro-álcali.
- Reducción de mercurio en productos.
- Investigación del transporte atmosférico del mercurio y su destino en los compartimientos ambientales.
- Gestión de desechos con mercurio.
- Suministro y almacenamiento de mercurio.
- Reducción del mercurio en la industria del cemento.

Como resultado de las diferentes evaluaciones, y ante la necesidad de adoptar medidas a nivel internacional, en Febrero de 2009 el entonces Consejo de Administración del PNUMA decidió iniciar el proceso de negociación hacia un instrumento vinculante sobre el mercurio, la elaboración de dicho instrumento se encomendó al Comité Intergubernamental de Negociación (CIN) con el apoyo de la Subdivisión de Productos Químicos, División de Tecnología, Industria y Economía (DTIE), del PNUMA. Todos los gobiernos fueron invitados a participar en el CIN; las organizaciones intergubernamentales y organizaciones no gubernamentales participaron como observadores.

La labor del CIN se llevó a cabo mediante cinco sesiones durante un periodo de tres años. Los lugares y fechas de las mismas fueron las siguientes:

- CIN 1: 7-11 junio 2010, Estocolmo, Suecia.
- CIN 2: 24-28 enero 2011, Chiba, Japón.
- CIN 3: 31 octubre - 4 Noviembre 2011, Nairobi, Kenia.
- CIN 4: 27 junio - 2 julio 2012, Punta del Este, Uruguay.
- CIN 5: 13-18 enero 2013, Ginebra, Suiza.

En la región de América Latina y el Caribe, para la preparación de las reuniones del CIN, se realizaron cinco consultas regionales:

- Kingston, Jamaica, 10 -11 de Marzo de 2010.
- Ciudad de Panamá, Panamá, 23-26 noviembre de 2010.
- Ciudad de Panamá, Panamá, 19-23 de septiembre de 2011.

- Brasilia, Brasil, 21-25 mayo de 2012.
- Bogotá, Colombia, 26-29 noviembre de 2012.

Como resultado de las reuniones del CIN, se acordó el texto del instrumento jurídicamente vinculante sobre mercurio, llamado Convenio de Minamata sobre el Mercurio. El texto fue adoptado formalmente durante la Conferencia de Plenipotenciarios, que tuvo lugar en Kumamoto, Japón, del 10 al 11 de Octubre de 2013. Para diciembre de 2013 el Convenio contaba ya con una Parte (Estados Unidos) y 94 firmas incluyendo gran parte de los países de la región de América Latina y el Caribe. Para que el Convenio entre en vigor se necesita que 50 países lo ratifiquen, se estima que esto puede tener lugar en septiembre de 2015 y posteriormente en un plazo de 2-3 años se formalice la adopción del mismo [62].

Línea del tiempo de eventos globales sobre el mercurio

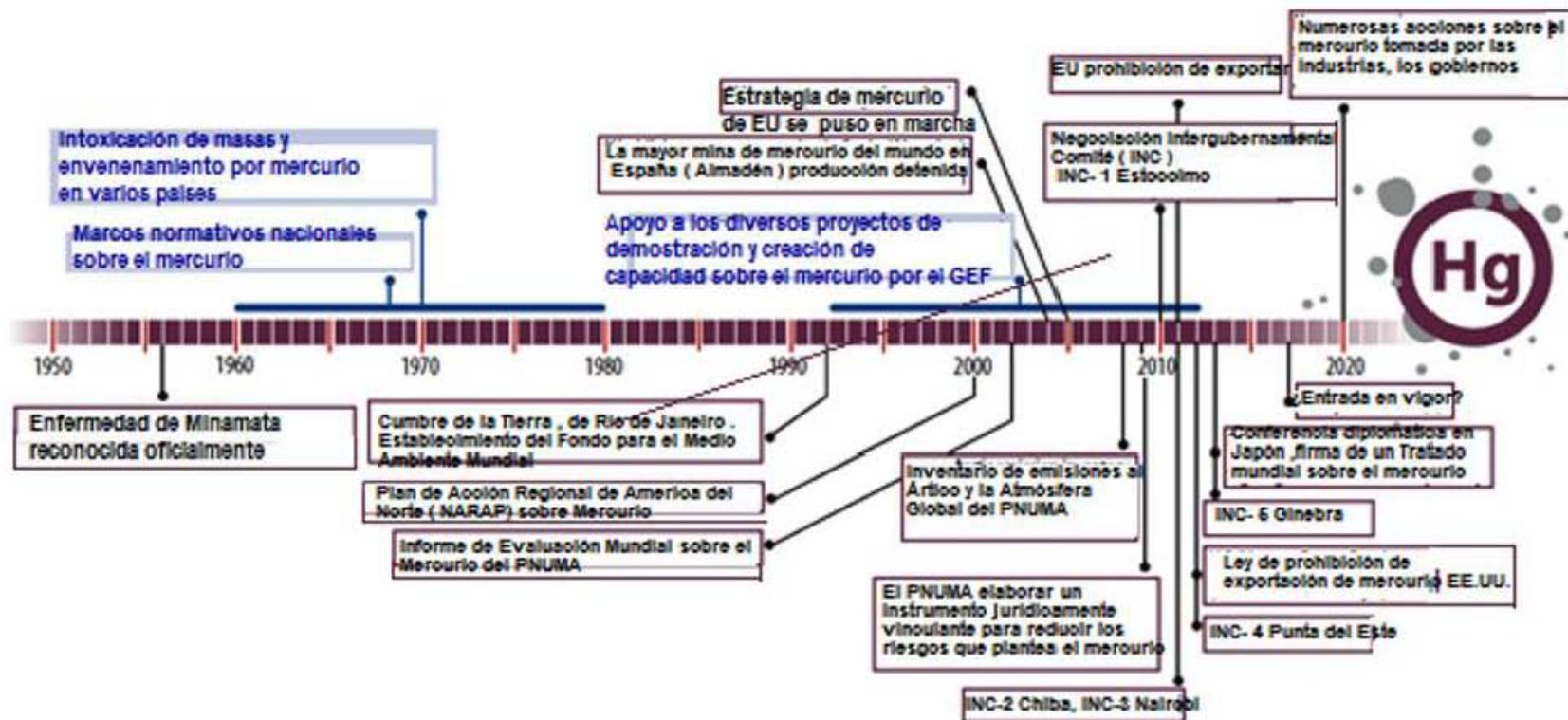


Figura V.2 Línea del tiempo de eventos globales sobre el mercurio (UNEP)

V.3 Antecedentes en México

En lo que respecta a la situación en México, se tienen registros de la producción de mercurio desde 1891, y en los últimos años ha mostrado la misma tendencia descendente que la producción mundial. Entre 1920-1929 su producción fue mínima y alcanzó su máximo de 1,118 toneladas en 1942; en 1991 se produjeron 340 toneladas de mercurio, mientras que en 1994 sólo 11 toneladas. A partir de 1995 no se tienen registros de su extracción minera [63]. Sin embargo, a partir de 2012 se reinició la explotación artesanal de minas de mercurio en México y se incrementaron las exportaciones hasta más de 400 toneladas en el 2014.

Por otro lado, la producción secundaria de mercurio continúa, en particular al recuperarlo como subproducto de la extracción de plata y oro a partir de jales antiguos mineros en el estado de Zacatecas, donde se producen alrededor de 20 toneladas anuales.

El último inventario de liberaciones de mercurio disponible para el país data de 2008 (INE, 2008). El inventario se elaboró sobre la base de la información presentada por 895 instalaciones en cuanto a liberaciones de mercurio y compuestos de mercurio. La existencia de una serie de incertidumbres significa que los datos deben ser tratados con precaución. No obstante, los hallazgos son indicativos de ciertas tendencias. Según el inventario, en el año 2004, se liberaron un total de alrededor de 448 toneladas de mercurio. La extracción y procesamiento del oro fue la mayor fuente de emisiones de mercurio, seguidos de pilas, rellenos sanitarios y confinamientos controlados. El inventario también revela que aproximadamente 40% se liberan como residuos (185), mientras que sólo el 10% se emite al aire [64].

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece en su artículo 4º que toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y

bienestar y que el Estado garantizará el respeto a este derecho y que el daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque.

Las dependencias del Gobierno Federal relacionadas con el control y manejo del mercurio son la Secretaría del Trabajo y Previsión Social, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, la secretaría de Economía y la Secretaría de Salud. Adicionalmente, la Secretaría de Hacienda y Crédito Público a través de la Administración General de Aduanas coordina el movimiento comercial de mercurio en las fronteras y mantiene información sobre las importaciones y exportaciones de mercurio [65].

En México, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) contempla garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente sano para su desarrollo, salud y bienestar por lo que también se pretende dar un manejo integral a los residuos como lo dictamina la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) y también en el ámbito Internacional a través de los convenios de Basilea. La Figura V.3 ilustra los diferentes niveles de la legislación aplicable en materia de residuos en el país.

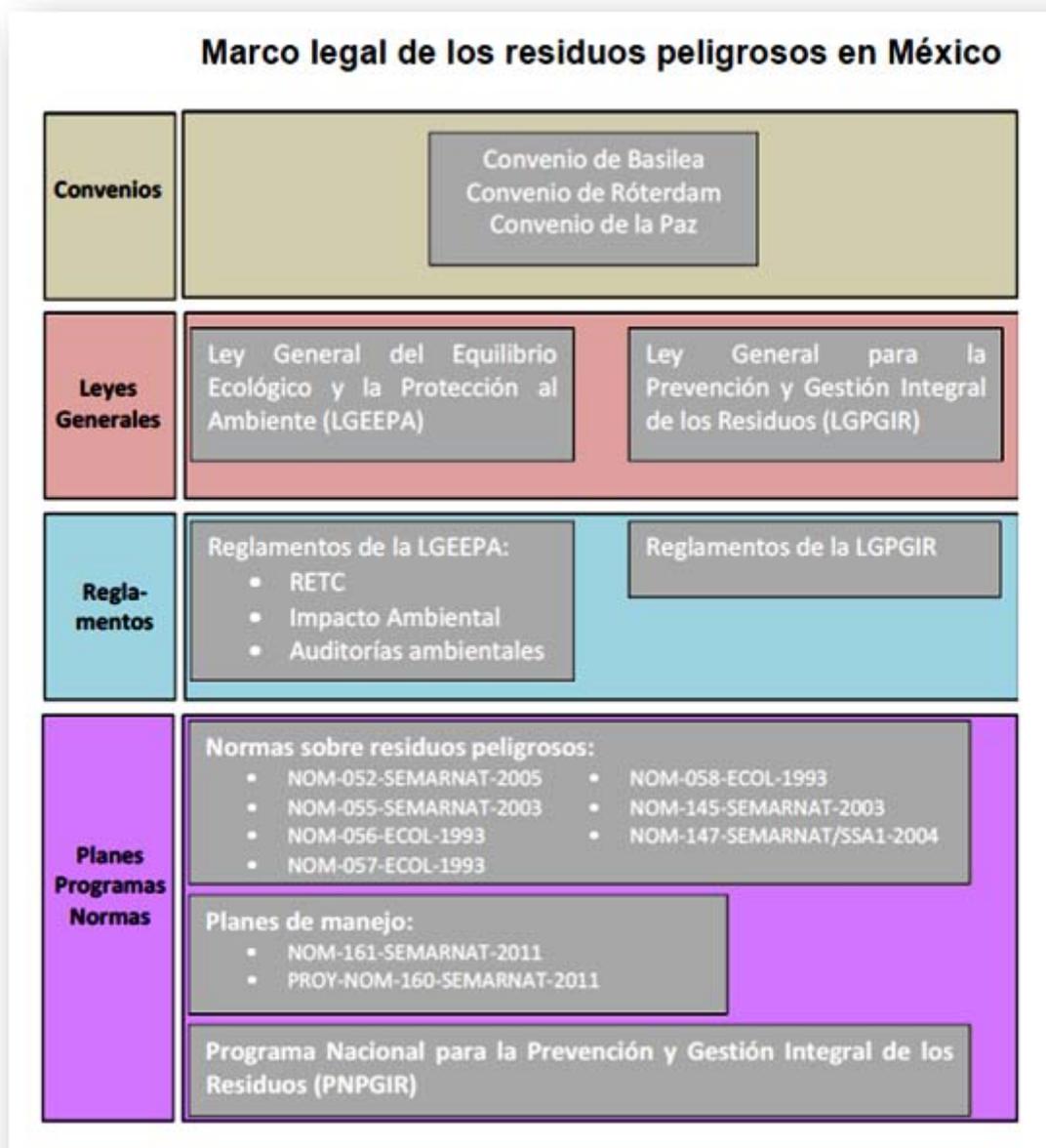


Figura V.3. Marco legal de residuos en México (INECC 2013)

CAPÍTULO VI

HACIA EL FUTURO DEL MERCURIO

VI.1 Prevención y control.

Como consecuencia de la implementación del Convenio de Minamata se generará la obligación de reducir y eliminar liberaciones de mercurio, así como buscar alternativas de sustitución por algún otro tipo de sustancia que pueda actuar de la misma manera pero que represente menores riesgos.

El control de las liberaciones de mercurio pueden darse a través de:

- Reducción y consumo de mercurio en materias primas y productos que contiene o utilizan mercurio (minería, amalgamación, etc.)
- Control de las liberaciones intencionales / no intencionales de mercurio.
- Gestión de residuos de mercurio (confinamiento, reutilización, valorización)

Sustitución del uso de mercurio en productos y procesos

Entre las medidas de sustitución de mercurio en productos y procesos se cuenta con las siguientes:

- La limitación del uso de mercurio, excepto en actividades de minería artesanal de oro hasta que se puedan transferir a ese sector tecnologías apropiadas y a precios accesibles.
- El control de tecnologías obsoletas y la exigencia del uso de mejores prácticas ambientales y técnicas disponibles para reducir o prevenir las emisiones de mercurio a la atmósfera y en el agua.
- La eliminación gradual del mercurio y los productos que lo contienen a través del desarrollo de alternativas o materiales sustitutos.

Limitación de la movilización de mercurio nuevo en la biosfera

Se debe considerar entre las medidas encaminadas a reducir la producción de materias primas y productos que generen emisiones de mercurio:

- La prevención de la presencia de mercurio en forma de impurezas en los combustibles (carbón, diésel, gasolinas, etc.).
- Prevención de procesos artesanales de extracción y destilación en minas de mercurio.

Reducción del consumo

Entre las medidas para reducir el consumo de materias primas y productos que generen emisiones de mercurio:

- La limitación o prevención de la exportación e importación de mercurio elemental o de productos que contengan mercurio (por ejemplo, baterías, productos farmacéuticos, productos de cosmética, etc.).

Para eliminar completamente el uso de mercurio, se necesita ampliar la investigación y desarrollo de alternativas que no afecten al ambiente y salud humana y que sean costo-efectivas.

Para sustituir el mercurio de lámparas fluorescentes, conocidas por su bajo consumo de energía, todavía no se dispone de alternativas 100% libres de mercurio en el mercado. Sin embargo, se ha estado trabajando para reducir la cantidad de mercurio que contienen las actuales. Las lámparas que antes requerían 20-40 mg de mercurio cada una, ahora se pueden conseguir en el mercado con sólo 3 mg. Lamentablemente, los precios de las lámparas modernas de bajo contenido de mercurio no pueden competir con los de las lámparas que contienen mayor cantidad y los consumidores en general no distinguen las diferencias entre ellas. Asimismo, se debe considerar el crecimiento en el consumo de lámparas.

Las opciones más conocidas de tecnologías comprenden medidas como las siguientes:

- Conversión a tecnologías generadoras de energía de gas natural, petróleo o combustibles no fósiles
- Aumento de la eficiencia energética
- Prohibición de usar mercurio en productos
- Impuestos u otras medidas disuasorias del uso de mercurio en productos
- Etiquetado de productos

VI.2 Medidas

Las medidas no técnicas para prevenir y controlar liberaciones de flujos de residuos pueden ser normativas, económicas y educativas/informativas. Algunos ejemplos de estas son:

Medidas normativas

- Contar con mayor vigilancia para que la eliminación de los residuos que contengan mercurio y procesos donde se utiliza, y asegurar un manejo adecuado de los residuos.
- Evitar que el mercurio en los residuos de productos y procesos se mezcle con residuos menos peligrosos, y asegurando que se recolecten y traten por separado.
- Establecer límites máximos permisibles de mercurio en los lodos de depuración que se disponen en tierras agrícolas.
- Evitar la recomercialización de mercurio usado y reciclado.
- Vigilar que no se cometa el vertido ilegal de residuos.
- Evitar las descargas directas e indirectas de mercurio en las alcantarillas comunes o el sistema de tratamiento de aguas, o cualquier modo de eliminación de mercurio en el agua.
- Controlar que todos los materiales o residuos que contengan mercurio y estén almacenados *in-situ* en una empresa industrial o comercial se mantengan en recipientes herméticos e impermeables, y que la organización tenga un plan y un calendario escritos para eliminar esos materiales en forma adecuada.

- Monitorear la eliminación en tierra de lodos de depuración, fertilizantes u otros materiales que excedan las normas internacionales fiables sobre contenidos de mercurio.

Medidas económicas

- Desarrollar impuestos y tarifas sobre la eliminación de residuos peligrosos (incineración especial, vertederos dedicados, etc.) que reflejen cabalmente los costos reales para la sociedad y el medio ambiente.
- Desincentivar los mercados internacionales para no generar tráfico ilícito.

Medidas informativas y educativas

- Educar al público acerca de la eliminación apropiada de productos con contenido de mercurio.
- Instalar puestos de recolección a donde el público pueda llevar fácilmente esos productos separados.
- Crear varios indicadores clave (iconogramas) y dar a conocer el progreso que se realiza en la gestión responsable del mercurio.
- Incluir en los programas universitarios cursos de medio ambiente y sustentabilidad, así como del análisis del ciclo de vida de los materiales.

Medidas técnicas

Las medidas técnicas de gestión de residuos mercuriales se pueden dividir en medidas de pretratamiento y medidas de control de emisiones.

Medidas de pretratamiento

- Vigilar y limitar las liberaciones de mercurio al medio ambiente tratando los residuos peligrosos y residuos médicos mediante tecnologías ambientalmente amigables.

Medidas de control de emisiones

- Asegurar que los residuos mercuriales no se incineren evitando su emisión al aire mediante el uso de las mejores tecnologías disponibles, etc.

VI.3 Actividades realizadas para lograr un manejo seguro del mercurio

Incluso los países que se esfuerzan por separar los productos que contienen mercurio del flujo general de residuos tienen dificultad para alcanzar índices de recolección satisfactorios y han descubierto que la recolección y tratamiento separados implican costos adicionales para la sociedad. Por lo tanto, reducir al mínimo el uso de mercurio en productos puede ser una meta fundamental en un programa de manejo.

A continuación (Tablas VI.1, VI.2 y VI.3) se muestra un panorama general global de cómo se han desarrollado esfuerzos globales para que los efectos nocivos del mercurio se reduzcan.

Tabla VI.1– Panorama general de los acuerdos o instrumentos internacionales que contienen disposiciones relativas al mercurio

Acuerdo o instrumento internacional	Regiones cubiertas por el acuerdo o instrumento	Pertenencia del acuerdo o instrumento con respecto al mercurio	Tipos de medidas dirigidas al mercurio que establecen en el acuerdo o instrumento
Convenio LRTAP y su protocolo en Aarhus de 1988 sobre metales pesados	Europa, Canadá y Estados Unidos.	Se ocupa del mercurio y sus compuestos y de liberaciones, productos, residuos.	Definición de objetivos, compromisos vinculantes sobre reducción de las liberaciones y vigilancia.
Convenio de OSPAR	Noreste Atlántico, mar Norte.	Se ocupa del mercurio y sus compuestos y de liberaciones, productos, residuos.	Definición de objetivos, compromisos vinculantes sobre reducción de las liberaciones, vigilancia e información.
Convenio de Helsinki	Mar Báltico	Se ocupa del mercurio y sus compuestos y de liberaciones, productos, residuos.	Definición de objetivos, compromisos vinculantes sobre reducción de las liberaciones y vigilancia.

Convenio de Basilea	Mundial	Cualquier residuo que contenga mercurio o esté contaminado por él.	Compromisos vinculantes en la relación con el transporte internacional de residuos peligrosos, procedimiento de información y aprobación de la importación y exportación de residuos peligrosos.
Convenio de Róterdam	Mundial	Se ocupa de los compuestos inorgánicos del mercurio compuestos alquílicos y acrílicos empleados como plaguicidas.	Compromiso vinculante en relación con la importancia de estos compuestos de mercurio cubiertos, procedimientos para el intercambio de información y notificación de exportaciones
Enfoque Estratégico para la Gestión de Productos Químicos a Nivel Internacional	Mundial	Busca un manejo seguro de los productos químicos al 2020	Compromiso no vinculante pero que coordina todos los demás acuerdos en materia de sustancias químicas y residuos
Convenio de Estocolmo	Mundial	El convenio no se ocupa de mercurio	-

Tabla VI.2 Panorama general de los programas y organizaciones internacionales con actividades relacionadas con los efectos adversos del mercurio en la salud y el medio ambiente.

Programa u organización internacional	Regiones cubiertas	Pertinencia del acuerdo o instrumento con respecto al mercurio	Tipos de actividades relacionadas con mercurio
International Agency for research on cancer (IARC)	Mundial	Trata la evaluación de riesgo cancerígeno de sustancias químicas, incluido el mercurio para humanos.	Evaluación sobre las distintas sustancias químicas, información y directrices.
Organización Internacional del Trabajo (OIT)	Mundial	Trata de cuestiones sobre la salud y seguridad laboral relacionadas con la utilización de sustancias químicas, incluidas actividades de minería en pequeña escala y mercurio.	Información de directrices, mejora de la capacidad.
International Programme of Chemical Safety (IPCS)	Mundial	Trata aspectos del mercurio relativos a la salud y al ambiente.	Información (evaluación de riesgos, datos científicos e información preventiva).
Organización para la cooperación y desarrollo económicos (OCDE)	Estados miembros de las OCDE	Trata del mercurio y los compuestos de mercurio y los compuestos del mercurio en liberaciones, productos y residuos.	Información, recomendaciones.
Programa Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)	Mundial	Trata de los metales pesados.	Definición de objetivos y directrices.
Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI)	Mundial	Trata las actividades industriales sostenibles desde el punto de vista ambiental, incluida la minería artesanal.	Información, directrices, mejora de capacidad.
Banco Mundial	Mundial	Aborda actividades industriales sostenibles desde el punto de vista ambiental, incluida la minería artesanal.	Información, directrices, mejora de capacidad.

Tabla VI.3 Panorama general de las iniciativas subregionales y regionales relacionadas con los efectos adversos del mercurio en la salud y el medio ambiente.

Iniciativa subregional o regional	Regiones cubiertas	Pertenencia de la iniciativa con respecto al mercurio	Tipos de medidas relativas al mercurio establecidas en la iniciativa
Plan de Acción del consejo del Ártico (ACAP)	Región del Ártico (Canadá, Dinamarca, Estados Unidos de América, Finlandia Islandia, Noruega, Rusia y Suecia).	Trata del mercurio y los compuestos de mercurio en liberaciones, productos y residuos.	Definición de objetivos, proyectos de cooperación para la reducción de emisiones, vigilancia.
Estrategia binacional para las sustancias tóxicas en los Grandes Lagos	Canadá y Estados Unidos de América.	Trata del mercurio y los compuestos de mercurio en liberaciones, productos y residuos.	Definición de objetivos, información, mejora de la capacidad.
Plan de Acción sobre el mercurio de los Gobernadores de Nueva Inglaterra y los Primeros Ministros del Este de Canadá	Canadá y Estados Unidos de América.	Trata del mercurio y los compuestos de mercurio en liberaciones, productos y residuos.	Definición de objetivo información, mejora de la capacidad, programas de sensibilización y divulgación.
Plan de Acción Ambiental en el Nórdico	Región nórdica (Dinamarca, Finlandia, Islandia, Noruega y Suecia).	Trata de metales pesados	Definición de objetivos, información, mejora de capacidad.
Plan de Acción regional de América del Norte sobre el mercurio	Región de América del Norte (Canadá y Estados Unidos de América y México)	Trata del mercurio y los compuestos de mercurio en liberaciones, productos y residuos.	Definición de objetivos, información, mejora de capacidad.
Conferencias sobre el Mar de Norte	Mar del Norte (Alemania, Bélgica, Dinamarca, Francia, Noruega, Países Bajos, Reino Unido, Suecia y Suiza).	Trata de metales pesados	Definición de objetivos, información.
Órgano Coordinador de los Mares de Asia Oriental Proyecto PNUAM/FMAM sobre inversiones de las tendencias de degradación del ambiente en el mar de China Meridional y el Golfo de Tailandia.	Mar de China Meridional y golfo de Tailandia.	Trata de los metales pesados incluidos la comunicación con mercurio en el agua de mar sedimentos y organismos marinos.	Información, reducción de las fuentes.

CONCLUSIONES

El mercurio es un elemento de la naturaleza que ha mostrado tener una gran cantidad de usos en diversas aplicaciones dadas sus propiedades y sus condiciones de ser el único metal en estado líquido a temperatura ambiente y a sus propiedades físico-químicas particulares, destacando su uso en aparatos de medición y en diversos usos mineros, entre otros. Sin embargo, este elemento ha resultado tener propiedades tóxicas importantes, lo cual aunado con su uso extendido y el manejo inadecuado de residuos que lo contienen ha generado diversos problemas de contaminación ambiental. Esto ha generado la necesidad de contar con alternativas más seguras que sean costo-efectivas.

En los últimos años, ha sido necesario plantear acciones para poder proponer un manejo adecuado del mercurio lo que llevo al establecimiento de medidas globales que han llevado a la sustitución de éste, ya sea en usos industriales, médicos, etc., tratando de propiciar una eliminación gradual de todos los usos existentes.

Desde el punto de vista del panorama mundial del Convenio de Minamata se plantean controles y reducciones en una amplia gama de productos, procesos e industrias en los que se utiliza mercurio o que lo liberan o emiten. El tratado también se ocupa de la extracción directa de mercurio, la exportación e importación del metal y el almacenamiento del mercurio de desecho en condiciones de seguridad.

De poder llevarse la implementación total del convenio, se podrán identificar las poblaciones en situación de riesgo, se impulsará la atención médica y se impartirá una mejor formación a los profesionales de la salud en la detección y el tratamiento de los efectos derivados del mercurio. Sin embargo, en sus primeros años de implementación se espera un encarecimiento de este material y a su vez de los usos clandestinos de dado el desfase en el grado de implementación entre los países productores y usuarios.

Dentro del marco de nuestro país, uno de los principales riesgos está relacionado con el manejo inadecuado de los residuos con mercurio, los cuales por definición de

Ley son considerados como residuos peligrosos y por lo tanto su regulación compete a la federación. Asimismo, existe el riesgo de existencia de explotación artesanal de mercurio elemental, dado que se cuenta con yacimientos mineros en 22 estados del país.

En México, existe capacidad para la disposición final de residuos de mercurio en los dos confinamientos existentes en el país; sin embargo, se requieren modificaciones al marco legal de forma que se logre la disposición extensiva de mercurio líquido debido a que por mandato de ley está prohibido el confinamiento de residuos líquidos y estos deben ser estabilizados y/o solidificados. Adicionalmente, se cuenta con diversas empresas para el acopio de este tipo de residuos, utilizando procesos como el de retorta para generar mercurio de suficiente calidad para ser utilizado nuevamente en diferentes productos y procesos.

Si bien es importante implementar las medidas que limitan el uso de mercurio es aún más importante evaluar las implicaciones económicas que esto representa ya que actualmente no existe una alternativa 100% costo-efectiva. Adicionalmente, existen muchas comunidades de escasos recursos en el país cuya única actividad de supervivencia es la extracción artesanal de mercurio, lo cual convierte la problemática en un foco de atención social.

Aunado a lo anterior es necesario crear conciencia en la comunidad sobre los peligros que representa a la salud el uso del mercurio. Esto es difícil dado que los efectos de la exposición generalmente son de largo plazo.

Por otro lado, existe la preocupación de su manejo en usos culturales por grupos minoritarios como a sanadores folclóricos, dueños de botánicas, artesanos, etc. Podemos reconocer que hoy por hoy, hay un comercio importante y permanente de mercurio y productos que lo contienen, parte del cual es ilícito. Pese a que en los últimos años han disminuido las cantidades de mercurio comercializadas (y extraídas), todavía se transportan cantidades considerables. Una preocupación en particular, es el hecho de que no ha disminuido la demanda en muchos países en desarrollo.

Finalmente, es importante mencionar que el mercurio es un elemento de la naturaleza, que siempre ha existido, y no se puede destruir, afortunadamente cabe la posibilidad de reciclar el mercurio que está en circulación, sin necesidad de seguir extrayéndolo de las minas.

REFERENCIAS

- [1] Mercury and the environment basic facts, (2004). Government of Canada, Recuperado en octubre de 2014, de <https://www.ec.gc.ca/mercure-mercury/default.asp?lang=En&n=9A4397AD-1>
- [2] Sloane, J., (1999). "Mercury: Element of the ancients" The promise of power Center for Environmental Health Sciences, Dartmouth College. Recuperado en octubre de 2014, de <http://www.dartmouth.edu/~toxmetal/mercury/history.html>
- [3] Yong, C., & Tong, L. (1985). "Application of mercury survey technique over the mausoleum of Emperor Qin Shi Huang". *Journal of Geochemical Exploration*, 23(1), pp. 61-69.
- [4] Wright, D. C., (2001). "The History of China", *The Greenwood histories of the Modern Nations*. Westport, Conn. Greenwood Press.
- [5] Pendergast, D. M., "Ancient maya mercury". *Science* Volume 217, Issue 4559, pp. 533-53.
Recuperado en octubre de 2014 de <http://www.sciencemag.org/content/217/4559/533>
- [6] Hesse, R. W., (2007). "Jewelrymaking through history". Greenwood Publishing Group. pp. 120.
- [7] Stillman, J. M., (1960). "Story of Alchemy and Early Chemistry". Dover Publications.
- [8] Wilson, A.J., (1994). "The living rock: the story of metals since earliest time and their impact on developing civilization". *Woohead Publishing Ltd Cambridge*, pp. 291.

[9] D'Itri, P.A.; D'Itri, F.M., (1977). "Mercury contamination: a human tragedy". Wiley – Interscience, John Wiley & sons, New York , pp. 311. Recuperado en octubre de 2014 de <http://www.link.springer.com/article/10.1007%2FBF01866442>

[10] Goldwater, L., (1971). "Mercury:A history of quicksilver", Baltimore York Press.

[11] Kesler, S. E., (1994). "Mineral resources, economics and environment". MacMillan College.

[12] Eisler, R., (2006). "Mercury hazards to living organisms". PressTaylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW.

[13] Emsley, J., (2003). "Nature's building blocks: an A-Z guide to the elements" (2003). Oxford University Press, pp. 261.

[14] Holmyard J, E. ,(1931). "Makers of Chemistry" Oxford at the Clarendon Press. pp. 57.

[15] Cox, R., (1997). "The Pillar of Celestial Fire". 1st World Publishing, pp. 260.

[16] "Mercury basic information". Government of USA. Recuperado en noviembre de 2014 de <http://www.epa.gov/hg/faq-espanol.html>

[17] Ficha de Seguridad. Programa Internacional de Seguridad Química. Naciones Unidas) mercurio. Recuperado en noviembre de 2014 de http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=en&p_card_id=0056&p_version=1

[18] Risher J. F., (2003). "Elemental Mercury and inorganic mercury compounds human health aspects". Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), Atlanta, Georgia, USA WHO.

[19] GrennFacts, Fact on Health and the Environment. 2015.

[20] Heron, H., (2001). Personal communication. Danish Environmental Protection Agency.

[21] Hudson, R. J. M., Gherini, S.A., Watras, C. J. and Porcella, D. B, (1994). "Modeling the biogeochemical cycle of mercury in lakes: The mercury cycling model (MCM) and its application to the MTL study lakes". Lewis publishers, CRC Prees Inc.

[22] Hylander, L. D., (2001). "Global mercury pollution and its expected decrease after a mercury trade ban. *Water, Air and Soil Pollution*, 125, pp. 331-344.

[23] Hylander, L. D. and Meili, M., (2002). "500 years of mercury production: global annual inventory by region until 2000 and associated emissions". *The science of the total environment*. 304, pp. 13-27. Recuperado en noviembre de 2014 de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12663168>

[24] "IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans", (1993). IARC (International Agency for Research on Cancer), Vol 58. Beryllium, cadmium, mercury, and exposures in the glass manufacturing industry. Lyon.

[25] Lamborg, C. H., Fitzgerald, W. F., Damman, A. W. H., Benoit, J. M., Balcom, P. H., Engstrom, D. R., (2002). "Modern and historic atmospheric mercury fluxes in both hemispheres: Global and regional mercury cycling implications. *GI Biogeochem Cycles* Vol 16 No 4, pp. 51-1-51-11.

[26] "Monitoring of Mercury Contamination from Gold Mining in the Tapajos and Madeira river basins, Brazilian Amazonas", (2000). ICON project financed by the European Commission and Government of Brazil with contributions from UK, Denmark, Germany, Brazil and Canada.

[27] Ikarashi, M., Sasaki, K., Toyoda, M. and Saito, Y., (1996). "Annual daily intakes of Hg, PCB, and arsenic from fish and shellfish and comparative survey of their residue levels in fish by body weight", *Esei Shikenjo Hokoku* (114), pp. 43-47.

[28] Ilyin, I., Ryaboshapko, A., Afinogenova, O., Berg, T. and Hjellbrekke, A. G., (2001). "Evaluation of transboundary transport of heavy metals in 1999. Trend analysis." EMEP Report 3/2001, Meteorological Synthesizing Centre - East, Moscow, Russia. Convention on long-range transboundary air pollution.

[29] Jackson, T. A., (1997). "Long-range atmospheric transport of mercury to ecosystems, and the importance of anthropogenic emissions". *Aquatic Ecosystem Restoration Branch, National Water Research Institute, Environ. Rev.* 5, pp. 99-120. Recuperado en diciembre de 2014 de <http://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.1139/a97-005>

[30] Jarup, L. , Berglund, M., Elinder, C. G., Nordberg, G. and Vahter, M., (1998). "Health effects of cadmium exposure - a review of the literature and a risk estimate." *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health.* Vol. 24 Supplement, pp. 1-51.

[31] Johansson, K., Bergbäck, B. and Tyler, G., (2001). "Impact of atmospheric long range transport of lead, mercury and cadmium on the Swedish forest". *Water, Air and Soil Pollution: focus.* Vol 1, Issue 3, pp. 279-297.

[32] Jonasson, I. R. and Boyle, R. W., (1971). "Geochemistry of mercury. Spatial Symposium on Mercury in Man's Environment, Environment Canada, Ottawa, Canada, pp. 5-21.

[33] Kannan, K., Tanabe, S., Iwata, H. and Tatsukawa, R., (1995). "Butyltins in muscle and liver of fish collected from certain Asian and Oceanic countries", Department of environment conservation, Ehime University, Tarumi 3-5-7, Matsuyam 790, Japan.

[34] Kviksilveravveckling i Sverige - redovisning av ett regeringsuppdrag (Substitution of mercury in Sweden (1998). KEMI - National Chemicals Inspectorate, KEMI, 5/98, The Chemicals Inspectorate, Solna, Sweden (in Swedish with English summary).

[35] Khordagui, H. and Dhari, A., (1991). "Mercury in Seafood: A Preliminary Risk Assessment for Kuwaiti Consumers", *Environment international* Vol. 17, Issue 5, pp. 429-435.

[36] Kibukamusoke, J. W., Davies, D. R. and Hutt, M. S. R., (1974). "Membranous nephropathy due to skin-lightening cream". *British Medical Journal*, pp.646-647.

[37] Rodriguez-Galeotti, E., (2006) "La minería de mercurio en México". *Boletín de Mineralogía*, pp. 29-36.

[38] Mason, R. P., Fitzgerald W. F. and Morel. F.M.M., (1994). "The biogeochemical cycling of elemental mercury: anthropogenic influences". *Geochem. Et Cosmochim Acta*, Vol. 58, No. 15, pp. 3191-319

[39] Hintelmann, H., R. Harris, A., Heyes, J. P. Hurley, C. A. Kelly, D. P. Krabbenhoft, S. Lindberg, J. W. M. Rudd, K. J. Scott and V. L. ST., (2002). "Reactivity and mobility of new and old mercury deposition in a Boreal forest ecosystem during the first year of the METAALICUS study". *Environ. Sci. Tech.* 36(23), pp. 5034-5040.

[40] "Global Mercury Assessment Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport. 2013", (2013). UNEP. Chemicals Branch, Geneva, Switzerland.

[41] "Issues of Concern: Updated Information on Human Health, Persistent Organic Pollutants, Radioactivity, and Mercury in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme", (2000). AMAP.

[42] "Mercury Study Report to Congress Office of Air Quality Planning & Standards and Office of Research and Development Volume II: An Inventory of Anthropogenic Mercury Emissions in the United States", (1997). EPA.

[43] Lamborg, C. H., Fitzgerald, W. F., Damman, A. W. H., Benoit, J.M., Balcom, P. H., Engstrom, D. R., (2002). "Modern and historic atmospheric mercury fluxes in both hemispheres: Global and regional mercury cycling implications". *GI Biogeochem Cycles*.

[44] "Evaluación mundial sobre el mercurio", (2005) Colaboración de PNUMA, OIT, FAO, OMS, ONUDI, UNITAR y OCDE - Programa Integracional para la Gestión racional de las Sustancias Químicas.

[45] Mercury-Tox-FAQ's, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), Atlanta, Georgia, US. Recuperado en febrero del 2015 de <http://www.atsdr.cdc.gov/es/>

[46] Casarett y Daull., (2005). "Fundamentos de Toxicología". Mc Graw-Hill Interamericana

[47]. Foá V, Bertelli G., (1984). "Indicadores biológicos para la valoración de la exposición humana a compuestos químicos industriales: Mercurio. (EUR 10704 EN)" Oficina de publicaciones de las comunidades europeas.

[48] Brosset, C., (1982). "Total airborne mercury and its origin". *Water, Air and Soil Pollution Volume 17, Issue 1*, pp.37-50.

[49] Kosta, L., Byrne, A. R. and Zelenko, V., (1975). "Correlation between selenium and mercury in man following exposure to inorganic mercury", *Nature* 254, 238, pp.238-239.

[50] Budtz-Jørgensen, E., Grandjean, P., Keiding, N., White, R. F. and Weihe, P., (2000). "Benchmark dose calculations of methylmercury associated neurobehavioural deficits". *Toxicology Letter*, pp.193-199.

[51] Canadian Dept. of Fisheries and Oceans., (1998). Recuperado de base de datos en marzo de 2014 de <http://www.dfo-mpo.gc.ca/science/coe-cde/cemam/teams-equipos/Postma/resume-eng.html>

[52] "The Mercury Study Report to Congress", (1997). EPA prepared this report to fulfill requirements of the Clean Air Act Amendments of 1990. Published in 1997.

[53] Dabeka R. W., (2003). "Examen del mercurio total en alimentos de la dieta y valoración de la ingesta dietética del mercurio de los adultos y de los niños a partir de dos ciudades canadienses, 1998-2000." Rev. Alimento Addit Contam. Jul; 20 (7) pp.629-638.

[54] Iverfeldt, Å. (1991). "Occurrence and turnover of atmospheric mercury over the Nordic countries". Water, Air and Soil Pollution, Volume 56, Issue 1, pp. 251-256.

[55] Veiga, M. and Hinton, J., (2002). "Abandoned artisanal gold mines in the Brazilian Amazon: A legacy of mercury pollution UN Natural Resources Forum. Volume 26, Issue 1, pp. 15-26.

[56] "Indicadores biológicos para la valoración de la exposición humana a los compuestos químicos industriales". Mercurio (EUR 10704 EN). Recuperado en marzo del 2015 de <http://publicaciones.san.gva.es/publicaciones/documentos/V.4006-1993.PDF>.

[57] Bakir F., Damluji S. F, Amin-Zaki L., Murtadha M., Khalidi A., al-Rawi N. Y. , Tikriti S., Dahahir H. I, Clarkson T. W., Smith J. C. , Doherty R. A., (1973). "Methylmercury poisoning in Iraq". Science, Vol. 181. No. 4096, pp. 230-241.

[58] "Minamata disease: The History and Measures", (2002). The Ministry of the Environment, Japan.

[59] “Investigación del derrame de mercurio del 2 de junio del 2000 en las cercanías de San Juan, Choropampa, y Magdalena, Perú, a la Oficina del Ombudsman y Asesor en Materia de Observancia de la corporación Financiera Internacional y el Organismo Multilateral de Garantía de Inversiones”. Recuperado en marzo de 2015 de <http://www.caombudsman.org/htmlenglish/documents/InformedelaComisionIndependienteInvestigaciondelderramemercuriodejunio2000.pdf>

[60] Mergler D., (1997). “Review of neurobehavioral deficits and déficits an river fisch consumption from the Tapaos(Brazil) and St. Lawrence (Canada). *Environmental Toxicology an Pharmacology*, 12, (2), pp. 93-99, Institute des sciences de l'environnement, Université du Québec à Montréal, recuperado en marzo de 2015 de <http://idrinfo.idrc.ca/Archive/ReportsINTRA/pdfs/1997s/116356.htm>

[61] Assessment 2011: Mercury in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway.

[62] Bank, M. S., (2012). “Mercury in the Environment”. Pattern and Process, University of California Press.

[63] “Informe sobre el Mercado del mercurio en México”., (2011). CCA. Comisión de Cooperación Ambiental de América del Norte.

[64] “Inventario Nacional de Liberaciones de Mercurio”, (2008).– México 2004. Informe Final, Contrato INE/ADE-016/2008 (Revisión 14 de Noviembre del 2008). Instituto Nacional de Ecología.

[65] Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Diario Oficial de la Federación el 8 de octubre de 2003.