



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

## FACULTAD DE QUÍMICA

**“DETERMINACIÓN DE MERCURIO EN CABELLO DE DOS  
POBLACIONES, UNA AL SUR DE LA ZONA METROPOLITANA DE  
LA CIUDAD DE MÉXICO (CIUDAD UNIVERSITARIA) Y OTRA DE  
LA REGIÓN MINERA DE SAN JOAQUÍN, QUERÉTARO”.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

QUÍMICA

PRESENTA

ISELA MARTÍNEZ FUENTES



Ciudad de México,

AÑO 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** M. en C. Francisco Rojo Callejas

**VOCAL:** Dr. José Luz González Chávez

**SECRETARIO:** Dra. Rocío García Martínez

**1ER. SUPLENTE:** Prof. Juan Carlos Hernández Chacón

**2DO. SUPLENTE:** Prof. Héctor Ariel Rico Morales

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA,  
UNAM Y SAN JOAQUÍN, QUERÉTARO**

**ASESOR DEL TEMA:**

---

Dra. Rocío García Martínez

**SUSTENTANTE**

---

Isela Martínez Fuentes

# ÍNDICE GENERAL

## Página

ÍNDICE DE FIGURAS .....	i
ÍNDICE DE TABLAS .....	ii
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	iv
CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	5
1.2 HIPÓTESIS .....	5
1.3 OBJETIVOS .....	6
1.3.1 Objetivo general .....	6
1.3.2 Objetivos específicos .....	6
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	6
CAPÍTULO II.....	8
2. ANTECEDENTES .....	8
CAPÍTULO III.....	16
3. MARCO TEÓRICO .....	16
3.1. Historia de la minería en México.....	16
3.1.1. La minería del mercurio .....	17
3.1.2. Panorama minero del estado de Querétaro .....	18
3.1.3. San Joaquín, Querétaro; región minera .....	21
3.2. Zona Metropolitana de la Ciudad de México.....	28
3.2.1. Calidad del aire de la ZMCM.....	29
3.2.2. Contaminantes tóxicos.....	34
3.3. El mercurio (Hg).....	36
3.3.1. Fuentes de emisión de Hg .....	37
3.3.2. Fuentes de exposición al Hg .....	39
3.3.3. Ciclo biogeoquímico del Hg .....	40
3.3.4. Toxicología del Hg.....	44
3.3.5. Biomarcadores de exposición al Hg .....	47
3.3.6. Métodos de análisis de Hg .....	52

<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>57</b>
4. MÉTODO EXPERIMENTAL.....	57
4.1. Matriz biológica.....	57
4.2. Toma y almacenamiento de la muestra.....	58
4.3. Preparación de las muestras de cabello.....	59
4.4. Análisis químico.....	61
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>62</b>
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	62
5.1. Aseguramiento de calidad.....	62
5.2. Poblaciones de estudio.....	74
5.2.1 Población no expuesta ocupacionalmente (Comunidad estudiantil al sur de la Ciudad de México).....	74
5.2.2 Población ocupacionalmente expuesta (Región minera, San Joaquín).....	84
<b>CAPÍTULO VI .....</b>	<b>90</b>
6. CONCLUSIONES .....	90
Referencias.....	92
ANEXOS .....	96

# ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Página</b>
Figura 3.1 Orografía del Estado de Querétaro .....	19
Figura 3.2 Distritos mineros metálicos en el Estado de Querétaro .....	21
Figura 3.3 Ubicación de la región de San Joaquín .....	22
Figura 3.4 Yacimientos minerales de Hg .....	24
Figura 3.5 Hornos artesanales y tubos de condensación para la extracción de Hg .....	25
Figura 3.6 Sector industrial y dirección del viento de la ZMCM.....	30
Figura 3.7 Emisiones de autos particulares por cambio de velocidad. ....	32
Figura 3.8 Formas químicas del Hg: Hg metálico (azogue) y Hg mineral (cinabrio).....	36
Figura 3.9 Compuestos de Hg en su ciclo biogeoquímico según su fuente .....	41
Figura 3.10 Ciclo biogeoquímico del mercurio.....	42
Figura 3.11 Biotransformaciones en el ciclo biogeoquímico del mercurio .....	43
Figura 3.12 Modelo toxicocinético del mercurio .....	47
Figura 3.13 Gráfico de la variación de la absorbancia en función de la concentración de analito.....	54
Figura 3.14 Diagrama esquemático del Generador de Hidruros .....	55
Figura 4.1 Zona de toma de muestra de cabello.....	58
Figura 4.2 Horno de microondas MARS5 .....	60
Figura 4.3 Recipientes de teflón cerrados utilizados para digestión.....	60
Figura 4.4 Espectrofotómetro GBC 932AA acoplado a Generador de Hidruros GBC HG3000. ....	61

# ÍNDICE DE TABLAS

## Página

Tabla 3.1 Regiones mineras del estado de Querétaro .....	20
Tabla 3.2 Localización de minas artesanales de mercurio .....	26
Tabla 3.3 Productos con contenido de Hg .....	33
Tabla 3.4 Emisiones de Hg por entidad en la ZMCM.....	34
Tabla 3.5 Factores de emisión por actividad de producción.....	35
Tabla 3.6 Fracciones de emisión de Hg para fuentes puntuales con respecto a PM10.....	35
Tabla 3.7 Propiedades químicas del mercurio .....	37
Tabla 3.8 Tipos de exposición al mercurio .....	39
Tabla 5.1 Curva de calibración de Hg N° 1 .....	63
Tabla 5.2 Curva de calibración de Hg N° 2 .....	63
Tabla 5.3 Curva de calibración de Hg N° 3 .....	64
Tabla 5.4 Curva de calibración de Hg N° 4 .....	65
Tabla 5.5 Curva de calibración de Hg N° 5 .....	65
Tabla 5.6 Curva de calibración de Hg N° 6 .....	66
Tabla 5.7 Curva de calibración de Hg N° 7 .....	67
Tabla 5.8 Curva de calibración de Hg N° 8 .....	67
Tabla 5.9 Curva de calibración de Hg N° 9 .....	68
Tabla 5.10 Lectura de absorbancia de los blancos.....	69
Tabla 5.11 Lectura de absorbancia de los blancos, descartando valores anómalos.....	71
Tabla 5.12 Valores de absorbancia media más, menos (n) veces la desviación estándar .....	72
Tabla 5.13 Curva de calibración promedio de Hg .....	73
Tabla 5.14 Concentración de Hg en hombres .....	76
Tabla 5.15 Concentración de Hg en mujeres .....	76
Tabla 5.16 Parámetros estadísticos de las concentraciones de Hg por género (n = 36) .....	76
Tabla 5.17 Clasificación de los participantes por género y edad (n = 36) .....	79
Tabla 5.18 Concentración de Hg con respecto a la frecuencia y porcentaje de distribución de los participantes clasificados por ubicación geográfica (n= 36) .....	82
Tabla 5.19 Frecuencia relacionada a la situación ocupacional de los participantes (n= 36) .....	82
Tabla 5.20 Frecuencia de los hábitos alimenticios, clasificados de acuerdo con el género de los participantes (n= 36) .....	83

Tabla 5.21 Frecuencia de uso de productos con contenido de Hg, clasificados de acuerdo con el género de los participantes (n= 36)..... 84

Tabla 5.22 Frecuencia del número de amalgamas dentales de los participantes (n= 36) ..... 84

Tabla 5.23 Concentración de Hg en mineros (n = 24) ..... 85

Tabla 5.24 Parámetros estadísticos de las concentraciones de Hg (n = 24) ..... 85

# ÍNDICE DE GRÁFICOS

## Página

Gráfico 5.1 Curva de calibración de Hg N° 1 .....	63
Gráfico 5.2 Curva de calibración de Hg N° 2 .....	64
Gráfico 5.3 Curva de calibración de Hg N° 3 .....	64
Gráfico 5.4 Curva de calibración de Hg N° 4 .....	65
Gráfico 5.5 Curva de calibración de Hg N° 5 .....	66
Gráfico 5.6 Curva de calibración de Hg N° 6 .....	66
Gráfico 5.7 Curva de calibración de Hg N° 7 .....	67
Gráfico 5.8 Curva de calibración de Hg N° 8 .....	68
Gráfico 5.9 Curva de calibración de Hg N° 9 .....	68
Gráfico 5.10 Dispersión de los valores de absorbancia de los blancos reactivo .....	72
Gráfico 5.11 Curva de calibración promedio de Hg .....	74
Gráfico 5.12 Diagrama de cajas y bigotes de concentración de Hg contra edad.....	77
Gráfico 5.13 Histograma de frecuencia de dispersión de Hg para hombres y mujeres.....	79
Gráfico 5.14 Histograma de frecuencia de hombres y mujeres respecto a la edad .....	80
Gráfico 5.15 Diagrama de dispersión y variabilidad de Hg para hombres y mujeres con respecto a la edad .	81
Gráfico 5.16 Diagrama de cajas y bigotes de concentración de Hg contra edad.....	86
Gráfico 5.17 Histograma de frecuencia de dispersión de Hg .....	87
Gráfico 5.18 Histograma de frecuencia con respecto a la edad .....	88
Gráfico 5.19 Diagrama de dispersión y variabilidad de Hg con respecto a la edad .....	89

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la contaminación por mercurio (Hg) se ha intensificado a lo largo de las últimas décadas, debido a su disponibilidad en el medio ambiente, siendo originada por procesos naturales y antropogénicos; el Hg es un elemento que está presente de forma natural en el aire, el agua y el suelo, acumulándose en todos los seres vivos sin ser esencial para ningún proceso biológico. El Hg es un elemento tóxico que ha sido ampliamente utilizado por el hombre para distintos productos y procesos a lo largo de la historia moderna, como parte de la industrialización y de la economía mundial; siendo aún objeto de comercio internacional.

El Hg posee una gran variedad de estados físicos y químicos (elemental/inorgánico/orgánico), con propiedades tóxicas intrínsecas a cada uno de ellos; toxicológicamente hablando, el Hg orgánico y fundamentalmente el metilmercurio ( $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ ) poseen una toxicidad más elevada que el Hg elemental ( $\text{Hg}^0$ ) y los compuestos inorgánicos ( $\text{HgS}$ ,  $\text{HgO}$ ,  $\text{HgCl}_2$ , entre otros). El Hg incluso en pequeñas cantidades puede causar graves problemas de salud, como por ejemplo daños al sistema nervioso central e inmunitario, el aparato digestivo, la piel, los pulmones y riñones, los ojos, entre otros; además puede causar perturbaciones en el comportamiento y lesiones renales.

La medición de la carga corporal de Hg se realiza mediante diferentes marcadores biológicos como: uñas, dientes, huesos, saliva, orina, sangre y cabello. El diagnóstico analítico por intoxicación con Hg resulta difícil, ya que la excreción urinaria de Hg no es un índice valorable, debido a que la mayor proporción de Hg orgánico absorbido se fija de manera muy estable en los hematíes (glóbulos rojos), mientras que el análisis en sangre refleja la concentración mineral de las células y los órganos; por lo tanto, ambas pruebas reflejan el nivel del mineral circulante en el momento en el que se toma la muestra, por lo que resulta necesario contar con dichos biomarcadores de exposición que permitan hacer intervenciones tempranas especialmente en las poblaciones más susceptibles. El cabello es el mejor indicador de exposición al Hg, a través de fuentes como la dieta, el ambiente y la ocupación, ya que permite evaluar con exactitud la concentración del mineral en el organismo, debido a que el metal se acumula en sus proteínas que poseen en abundancia

grupos sulfhídricos, de esta manera, el cabello funciona como dosímetro y la cantidad detectada en él es proporcional a la que se encuentra en el organismo (Echegaray y Gómez, 1984); además de que permite evaluar la contaminación a través del tiempo.

La principal ventaja del cabello como biomarcador reside en que es un método poco invasivo; en que la muestra es estable a temperatura ambiente, fácil de transportar y almacenar por largos periodos de tiempo, además de que no se requiere de entrenamiento especializado para su recolección; no obstante, hay que tener en cuenta que el crecimiento del cabello no se produce a velocidad uniforme, por lo que las sustancias permanecen de acuerdo con el crecimiento de éste en aproximadamente 1.20–2.0 cm/mes, sufriendo también contaminación externa.

El aporte de Hg a las poblaciones no expuestas ocupacionalmente se hace fundamentalmente a través de amalgamas dentales, alimentos contaminados (principalmente pescado y mariscos) y por el uso de productos de higiene personal que contienen este metal (tintes, cremas y jabones aclaradores, etc.). Salvo situaciones excepcionales de contaminación, la salud de la población en general no corre peligro por la presencia de Hg en la naturaleza; el mayor riesgo para la salud humana derivado de su presencia en la naturaleza se centra en la exposición ocupacional a éste, ya que es utilizado en la minería como producto principal o subproducto de la extracción y refinación de otros metales y minerales, así como en la siderurgia, entre otras actividades (Cespón, 2001). Por lo anterior, es importante disponer de técnicas analíticas de tal precisión y exactitud, las que al ser aplicadas a una matriz como el cabello, aporten resultados confiables.

De acuerdo con estudios realizados el Hg y sus diferentes especies químicas entran al organismo por diferentes rutas, como son: gastrointestinal, inhalatoria, cutánea o placentaria. La cinética del Hg comprende básicamente las siguientes etapas:

1) Absorción: el vapor de  $\text{Hg}^0$  tiene una alta presión de vapor que le permite liberarse fácilmente al ambiente y dependiendo de su grado de solubilidad en agua, éste se deposita en diferentes niveles del tracto respiratorio. Los compuestos como  $\text{HgS}$ ,  $\text{HgO}$  y  $\text{HgCl}_2$ , que ingresan al organismo por vía pulmonar, como en el caso de aerosoles, son absorbidos en menor grado que los del  $\text{Hg}^0$ . En el tracto gastrointestinal el  $\text{Hg}^0$  se absorbe en cantidades mínimas, su solubilidad dependerá de la posibilidad de oxidación del Hg o

de la formación de sulfuros. La absorción de los compuestos inorgánicos de Hg por la vía gastrointestinal depende del tipo de sal que forman. Para los compuestos mercuriosos ( $\text{HgF}$ ,  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ , entre otros), que casi no son solubles en agua, se puede esperar una baja absorción; sin embargo, pueden ser parcialmente convertidos a iones mercúricos en el lumen (espacio interno) gastrointestinal, que se absorben más fácilmente (ANM, 2003)

2) Distribución: las especies mercuriales, como  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ ,  $\text{HgS}$ ,  $\text{HgO}$  y  $\text{HgCl}_2$ , reaccionan con gran variedad de ligandos orgánicos que se encuentran en moléculas biológicas importantes. Los iones de Hg inorgánico se distribuyen en los tejidos y en pocas horas se encuentran en riñón, hígado, sangre, mucosa respiratoria, pared intestinal y colon, piel, glándulas salivales, corazón, músculo esquelético, cerebro y pulmón, en orden descendente de cantidad acumulada. Después de una semana, del 85 al 95 % de todo el  $\text{HgS}$ ,  $\text{HgO}$  y  $\text{HgCl}_2$  del organismo se almacena en el riñón. El  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  debido a su capacidad de atravesar membranas celulares y su gran resistencia a la biotransformación en los tejidos, se deposita principalmente en el sistema nervioso central.

Agencias Nacionales e Internacionales como el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Agencia de Drogas y Medicamentos (por sus siglas en inglés, FDA), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (por sus siglas en inglés, USEPA), establecen el límite máximo permisible de Hg en cabello de personas no expuestas ocupacionalmente entre 1 y 2  $\mu\text{g/g}$  (ppm), mientras que para aquellas que consumen pescado contaminado puede ser igual o mayor a 10 ppm, en tanto las personas ocupacionalmente expuestas en actividades odontológicas presentan niveles de hasta 7 ppm (PNUMA, 2002).

Por la importancia de sus efectos el Hg es un producto químico de preocupación mundial debido a su transporte a larga distancia en la atmósfera, su persistencia en el medio ambiente tras su introducción antropógena, su capacidad de bioacumulación en los ecosistemas y sus importantes efectos adversos para la salud humana y el medio ambiente, por lo que se ha establecido el Convenio de Minamata sobre el Mercurio. A partir de este acuerdo jurídicamente vinculante se conocerán existencias y fuentes de Hg en los países, se controlarán las emisiones y liberaciones de éste y sus compuestos, de actividades antropogénicas, como la generación de energía térmica a carbón, los incineradores de residuos, las fundiciones de metales no ferrosos y la industria del

cemento, la minería de oro a pequeña escala, la fabricación y el comercio de productos con Hg y aquellos procesos industriales en los que se utiliza en grandes cantidades como la industria cloro álcali (SEMARNAT, 2013).

Con la aplicación de este convenio, se tomarán medidas para el almacenamiento ambiental de Hg como mercancía y su control en la gestión de los desechos, además de establecer fechas de caducidad y medidas para la fabricación, importación y exportación de productos con Hg para el 2020, desalentándose así el uso de artículos con contenido de Hg para los cuales ya existen alternativas accesibles, técnicas económicamente viables y manufactura de nuevos productos que no lo contengan. Se han dispuesto excepciones a algunos productos para los cuales aún no hay sustitutos y se ha limitado el contenido de Hg para aquellos como las lámparas de bajo consumo. También se estableció el compromiso de elaborar estrategias para identificar y evaluar los sitios contaminados con Hg y sus compuestos, para su gestión adecuada, poniendo fundamentalmente atención en la salud humana (MMAJ, 2013).

Este convenio, claramente está inserto en el marco conceptual de desarrollo sostenible, y el énfasis de su preámbulo y capítulos dan cuenta de eso. En este punto quisiera destacar entonces el acento puesto en la salud humana, conscientes de los problemas de salud, especialmente en los países en desarrollo, derivados de la exposición al Hg de las poblaciones vulnerables, en particular las mujeres, los niños y ancianos.

El convenio también destaca la importancia de asistencia técnica, para la implementación y transferencia de tecnología ambientalmente racional a los países en desarrollo considerando su capacidad de adecuación con tecnologías pertinentes a modo de sustituir el uso del Hg, buscando mejores opciones. Por la importancia que radica en la exposición al Hg en este proyecto se evaluaron los resultados de la determinación de Hg en cabello como biomarcador de exposición ambiental, en dos poblaciones de estudio.

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El estudio de la contaminación por Hg ha sido objeto de investigación durante décadas; sin embargo, en México existen pocos o nulos estudios o normas que establezcan los límites máximos de exposición a este metal. Sin embargo, existen estudios referentes a la exposición en la actividad odontológica (cabello y orina), pero ninguno ha estudiado la exposición a Hg en zonas altamente contaminadas.

Una de las poblaciones de estudio se encuentra potencialmente expuesta en la región minera de San Joaquín, Querétaro, zona con abundante riqueza en minas de Hg en su forma inorgánica (HgS, cinabrio), en las que la explotación informal del Hg es la principal actividad del sector económico para los pobladores de la región. La importancia del estudio de dicha población radica en la exposición al Hg por diferentes rutas (cutánea e inhalatoria) a la que se ven expuestos los mineros al no contar con el equipo de seguridad necesario para laborar en estas minas, por lo que su salud se ve afectada severamente por la explotación y manejo del cinabrio, además de que dicha explotación ha dejado a la intemperie escombros que siguen siendo una fuente de contaminación para los ecosistemas y para la gente de la región, debido a que el Hg permanece en el ambiente durante decenas, cientos e incluso miles de años.

La segunda población de estudio no expuesta ocupacionalmente pertenece a una zona urbana (Zona Metropolitana de la Ciudad de México), para la cual las principales fuentes de contaminación por Hg son antropogénicas, debidas a la contaminación del aire, agua y suelo por la industrialización; el uso de productos con contenido de Hg (tintes, jabones y cremas aclaradores) y el posible consumo de productos marinos contaminados.

## 1.2 HIPÓTESIS

- Los participantes de la región minera de San Joaquín podrían presentar niveles de concentración de Hg más elevados que los de la comunidad estudiantil.
- La variación en la concentración de Hg entre los participantes de ambas poblaciones dependerá de la distribución de las fuentes naturales, antropogénicas y del tiempo de exposición.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo general**

Determinar la concentración de Hg en cabello como biomarcador de exposición ambiental de dos comunidades distintas en México.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- a) Cuantificar la concentración de Hg mediante el análisis de cabello, comparando los resultados obtenidos con los límites máximos permisibles reportados por Agencias Nacionales e Internacionales (EPA, OMS, OPS, etc.).
- b) Evaluar la diferencia en la relación dosis - efecto y dosis – respuesta en las concentraciones de Hg, debido a factores como: edad, sexo, estado nutricional, hábitos de higiene personal, tratamientos cosméticos en el cabello y salud bucal.

## **1.4 JUSTIFICACIÓN**

San Joaquín, Querétaro es una de las regiones en donde se ubican algunos de los principales yacimientos de Hg de México, desde tiempos remotos ha ocupado un sitio relevante en la producción de Hg; mediante la descarga de los jales de las minas de HgS y otras menas metálicas sulfurosas que contribuyen con cantidades importantes, aún no determinadas de Hg a los cuerpos de agua, o bien en el proceso de refinación en el que las menas sulfurosas se calientan en las retortas u hornos, los cuales presentan una descarga significativa de Hg al aire, agua y suelo, por lo que la región está vedada a causa de su alta toxicidad y sus efectos adversos tanto al medio ambiente como a la salud de la población, tanto de la región como de zonas aledañas, debido a la disponibilidad y patrones de dispersión del Hg dentro de los ecosistemas.

En las grandes urbes como la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), la composición del aire, agua y suelo ha sido alterada o contaminada con sustancias químicas y polvo, provenientes del uso desmedido del automóvil, del funcionamiento de las fábricas y de los suelos carentes de cubierta vegetal, asfáltica u otro recubrimiento, así como de una gran variedad de actividades en donde se utilizan solventes dañinos o sustancias tóxicas como el Hg; con ello productos de uso común, incluidos los alimenticios

sufren contaminación, la cual llega por diversos mecanismos al ser humano, afectando su salud.

En México no se ha evaluado en forma detallada la generación y emisión de Hg al ambiente ni su distribución en los ecosistemas; por ello con este trabajo se pretende evaluar el grado de exposición a Hg de una población dedicada a la actividad minera de Hg, lo que ha afectado por tantos años a Sistemas Terrestres (agua, suelo, aire y planta).

## CAPÍTULO II

### 2. ANTECEDENTES

La preocupación en materia de salud y medio ambiente a causa de la presencia de metales pesados como el plomo (Pb), mercurio (Hg), cadmio (Cd), níquel (Ni), vanadio (V), cromo (Cr), cobre (Cu), aluminio (Al), arsénico (As), plata (Ag), etc., ha ido en aumento, debido a sus efectos tóxicos. Algunos de estos elementos son micronutrientes necesarios para la vida de los seres vivos, y así son absorbidos por las raíces de las plantas o forman parte de la dieta de los animales; la presencia de Hg que es uno de los elementos más tóxicos no se requiere en ningún ciclo biológico (Contreras, 1999).

Los griegos llamaban al Hg hidrargyrum, nombre del que proviene su símbolo. El primero en obtenerlo en estado puro fue Teofrasto de Ereso, en el 320 a.C., los griegos lo llamaron hidro argiros, es decir, plata líquida, de donde deriva su nombre latino hidrargyrum; mientras que los alquimistas de la Edad Media no lo consideraban un metal, sino la esencia de todos los metales. El químico francés Antoine Laurent de Lavoisier lo identificó por primera vez como elemento durante sus investigaciones sobre la composición del aire (REICOP, 2010).

Dado que el Hg es muy volátil y sus vapores son tóxicos para el hombre; resulta venenoso, puesto que nuestro organismo no es capaz de eliminarlo en su totalidad, siendo la principal vía de intoxicación la respiratoria. A lo largo de la historia se tienen antecedentes ambientales a partir de actividades especialmente relacionadas con la agricultura y la minería, los cuales han dado lugar a episodios de contaminación de ambientes o alimentos para consumo humano. Algunos de estos antecedentes dieron lugar a epidemias tóxicas consideradas verdaderas catástrofes por su magnitud, impacto o permanencia en el tiempo. Algunos ejemplos en los que ha intervenido el Hg se enlistan a continuación:

En la antigua Medina Azahara (actualmente ruinas próximas a Córdoba, España) en el siglo IX muchos servidores del palacio del Califa morían a causa de una especie de envenenamiento aéreo, hoy se sabe que era a causa de los estanques de Hg, que en verano a esas latitudes llega a volatilizarse (Elías y Ruíz, 2012).

« **Enfermedad del sombrero loco** » En el siglo XIX era frecuente que los trabajadores de la industria textil de fabricación de sombreros sufrieran enfermedades neurológicas, ya que en la preparación de fieltros se usaba cloruro de mercurio ( $\text{HgCl}_2$ ) o nitrato de mercurio ( $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ ) para suavizar y curtir las pieles animales, ambas sales se absorben por la piel; por lo que la prolongada exposición durante el trabajo a la acción de los mismos producía desórdenes nerviosos y locura. Problemas similares presentaban los primeros fotógrafos, ya que empleaban vapores de Hg para obtener los daguerrotipos (M. Berg, et al., 2008).

En la actualidad, el  $\text{HgCl}_2$  pasa a las aguas, procedente de los desperdicios de las celdas electrolíticas que usan electrodos de Hg y se vierten a los ríos. Podemos ingerir Hg, no sólo procedente de esta fuente, sino también, por el consumo de pescado que lo haya absorbido y concentrado; por ello existen controles legales sobre el pescado enlatado y el pescado fresco, lo que puede ser causa del rechazo de algunos suministros. Cualquier ingestión de Hg por encima del bajo umbral correspondiente a la eliminación diaria conduce a un envenenamiento por acumulación, que posee una naturaleza muy persistente (G. Rochow, 1981).

« **El desastre de Irak** » A finales de los sesenta y principios de los setenta, Irak tuvo una serie de cosechas fatales, dado que la "revolución verde" estaba empezando, Irak importó "trigo maravilla" de México. El problema era que la semilla podía enmohecerse durante la larga y húmeda travesía por el océano si no se le trataba con algún fungicida. El mercurio metílico resultó ser el fungicida más económico, ya que acababa de ser prohibido en Escandinavia y Estados Unidos, debido a los riesgos ambientales y toxicológicos; de manera que el mercado internacional estaba inundado y los precios cayeron.

Así, las semillas de trigo fueron tratadas con mercurio metílico y enviadas a Basra, en el sur de Irak, dado que el cargamento llegó tarde, los camiones y trenes que habían estado disponibles ya se habían utilizado en otras tareas. Así, pasaron otros dos meses antes de que el grano llegara a los campesinos. Para entonces la temporada de siembra ya había pasado, y los campesinos se quedaron con granos rosados que se les indicó no debían comer, sino sólo sembrar. Pero las cosechas recientes habían sido muy malas y los campesinos tenían muy poco o nada para alimentarse ellos mismos y a sus animales.

Los campesinos comenzaron a dar el grano a pollos u ovejas para ver si había algún efecto dañino; al no observar efectos empezaron a comerlo ellos mismos, principalmente en la producción de pan rosado. Sin embargo, al cabo de aproximadamente medio año, empezaron a presentarse casos de intoxicación por mercurio metílico, el cual causaba daños al sistema nervioso central, episodio en el que se calcula que murieron 10 000 personas y 100 000 más sufrieron daños cerebrales severos y permanentes (Jernelov, 2003).

« **La enfermedad de Minamata** » En Abril de 1956 se comenzó a observar un número creciente de personas que padecían de entumecimiento o temblor en las extremidades, la reducción del campo visual, dificultad para oír, y ataxia; algunos casos mostraban síntomas más graves, como la pérdida de conciencia, y otros resultaban en la muerte del paciente (MMAJ, 2013).

En Marzo de 1957 el Equipo del Ministerio de Salud y Bienestar (MSB) anunció que se debía al envenenamiento por consumo de pescados y mariscos capturados en la Bahía de Minamata, debido a posible contaminación con alguna sustancia química o metálica, por lo que la Cooperativa de Pescadores de Minamata se abstuvo de pescar en dicha bahía. En Julio de 1959, el Equipo de Investigación de la Facultad de Medicina de la Universidad de Kumamoto informó que la causa era un compuesto de Hg, siendo la consecuencia directa de la contaminación de efluentes los compuestos de  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  provenientes de las plantas químicas de Minamata, de Shin-Nippon Chisso Hiryo K.K. (nombre que posteriormente se cambia a “Corporación Chisso”) o la planta de Showa Denko K.K. en Kanose Town (actualmente llamado Aga Town).

En Septiembre de 1958, Chisso cambió el sistema de vertido de efluentes para el proceso de fabricación de acetaldehído; antes de este cambio, el efluente era vertido directamente al puerto de Hyakken en la Bahía de Minamata; bajo el nuevo sistema, el efluente era recolectado en la Piscina de Hachiman previo al vertido del sobrenadante en la boca del Río Minamata. Sin embargo, este nuevo sistema condujo a la aparición de nuevos afectados cerca y hacia el norte de la boca del río a partir de Marzo del año siguiente. En Octubre de 1959, el Ministerio de Comercio e Industria Internacional (MCII; actualmente, Ministerio de Economía, Comercio e Industria (MECI)) le ordenó a Chisso que eliminara el nuevo canal de desagüe y el vertido desde la Piscina de Hachiman hacia

la boca del Río Minamata se detuvo en el mes de Noviembre del mismo año (MMAJ, 2013).

Debido a este suceso el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) dio a conocer el Informe de Evaluación Mundial del Mercurio en el año 2002, donde está detallada la contaminación ambiental y los daños a la salud a escala mundial provocados por el Hg; para el año 2009 el Consejo de Gobierno del PNUMA adoptó una resolución para elaborar el acuerdo “Convenio de Minamata en materia de mercurio” con fuerza restrictiva para reducir los riesgos derivados del Hg, siguiendo la proposición del gobierno japonés de reflejar la voluntad de la comunidad internacional de no repetir los daños a la salud humana y la destrucción del medio ambiente tal como se vió en el caso de Minamata.

« **Mercurio en Almadén, España** » Los yacimientos de Hg del Distrito minero de Almadén representan una singularidad mundial, al ser el único caso de un metal, el Hg, que ha sido obtenido en una tercera parte de su producción mundial a partir de un solo yacimiento. El Distrito está formado por más de 60 puntos en los que se ha descrito la presencia de cinabrio (HgS). De estos 60 puntos, la mina de Almadén constituye el mayor, cuatro son yacimientos de tamaño considerable, que han sido objeto de explotación minera continúa (el Entredicho, las Cuevas, Nueva Concepción y Vieja Concepción), seis constituyen indicios minerales que han sido objeto de reconocimiento minero mediante labores superficiales, sin que puedan considerarse propiamente minas (el Alcor, Pilar de la legua, Guadalperal, Corchuelo, el Burcio y Tres hermanas), mientras que el resto se pueden considerar simplemente localidades con presencia de indicios de mineralización, sin que hayan sido objeto de labores de reconocimiento más que muy superficiales, por la escasez de presencia de HgS (Higuera, et. al., 2006).

La dispersión del Hg en el entorno de los yacimientos del Distrito de Almadén es el resultado evidente del desarrollo de los procesos de alteración supergénica de éstos. Los productos del proceso son, como en cualquier otro tipo de yacimiento, partículas sólidas conteniendo mineralización o productos asociados, que son dispersadas por el viento y las aguas superficiales, como iones y complejos del metal, así como vapores del metal que se emiten a la atmósfera. Afectando, por tanto, a todos los compartimentos ambientales del área, tanto inorgánicos: aire, aguas, sedimentos de arroyos y suelos, como orgánicos:

vegetación, animales (herbívoros y carnívoros); organismos acuáticos, que captan el Hg del agua de vegetales acuáticos, de los sedimentos de fondo, etc., bioacumulándolo en su organismo en forma de  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ .

Por su parte el hombre queda expuesto a estos contaminantes de forma directa, por la posibilidad de respirar los vapores, o beber aguas contaminadas, y de forma indirecta, a través de la cadena trófica, al consumir alimentos contaminados. En definitiva, se produce una afectación generalizada del medio ambiente local, con una extensión e intensidad que es función de muy diversos parámetros, tanto propios de las mineralizaciones (movilidad del elemento, capacidad de formar drenaje ácido de mina) como externos (topografía, climatología, tipo de vegetación, etc.).

« **Perú, Yanacocha** » La mina de Yanacocha es la mayor y más productiva mina aurífera en Sudamérica y la segunda más grande a nivel mundial. El 2 de junio del 2000, un camión vinculado a Newmont, RANSA (empresa que explota el yacimiento minero, en las cercanías de Cajamarca) derramó en Choropampa, en las inmediaciones de la mina, 150 kilogramos de Hg a lo largo de varios kilómetros. Algunos pobladores, pensando que el Hg contenía oro lo recogieron, algunos de ellos incluso lo llevaron a sus casas, 72 horas después, aparecieron los primeros casos de intoxicación en pobladores; para fines de julio se habían identificado aproximadamente 67 hogares con datos de contaminación ambiental por Hg (PNRQ, 2007).

« **La cuenca del 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 rudimentario que consiste en mezclar  $\text{Hg}^0$  con los sedimentos y suelo del río, para separar las partículas de oro que existen en el agua.

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

Estudios científicos realizados por universidades de Brasil y Canadá en la zona extractiva demuestran que el Hg estaba presente en el suelo, sedimentos fluviales, peces

y personas que viven en las cercanías del río. La deforestación masiva extiende el peligro al volver disponible el Hg depositado en el suelo después de cientos de años de esta actividad. Resultado 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 Hg en el cabello, por lo que se observaban cambios en el sistema nervioso a niveles de exposición relativamente bajos (PNRQ, 2007).

El equipo de investigación pudo comprobar también que las funciones motora y visual se veían perturbadas a niveles de exposición menores de los que se consideraban seguros (50 microgramos por gramo de pelo). 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.

El riesgo a la salud humana por intoxicaciones con Hg no proviene sólo de incidentes pasados, en la actualidad este tipo de contaminación se da tanto por fuentes naturales como antropogénicas. Al acumularse el Hg en el suelo, agua y aire, lo hace también en los seres vivos, debido a procesos de bioacumulación a medida que se avanza en la cadena trófica, las concentraciones van siendo más elevadas que en el medio ambiente o en los alimentos. La cadena alimentaria acuática es uno de los mecanismos más importantes de concentración del Hg, ya que en cada nivel trófico se presenta biomagnificación, es decir, que hay más mercurio en las algas que en el agua donde viven, pero aún más en el pescado que se alimenta de las algas, principalmente en pescado de gran tamaño que ocupa las últimas posiciones dentro de la cadena trófica, llegando al hombre por medio del consumo de productos acuáticos.

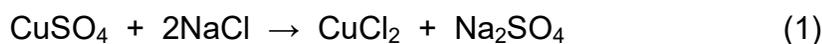
En el Periodo del Clásico fue donde los asentamientos mesoamericanos en la zona de la Sierra Gorda Queretana explotaron el Hg, por lo que las labores mineras formaban parte importante del sustento económico de estas civilizaciones, alcanzando una especialización tecnológica impresionante para su época, y manteniendo al mismo tiempo actividades económicas básicas como la agricultura, lo que aseguraba la supervivencia de sus habitantes. Se establecieron varias comunidades aledañas a las diversas labores mineras que se desarrollaron en la región, debido a que todas estas obras iban a rumbo de veta y

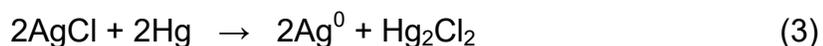
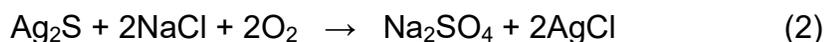
que la mineralización de éste es en forma de “bolseamientos”, la vida útil de estas obras era limitada, por lo que al agotarse la veta se tenían que trasladar a otro sitio y desarrollar nuevas obras (Sánchez, 2014). Esto nos da una idea de la cantidad de mineral explotado y el trabajo que se llevó a cabo desde hace cientos de años, un ejemplo de ello es el tan famoso y aún utilizado beneficio de patio.

« **Beneficio de Medina o beneficio de patio** » El “proceso de patio” o “amalgamación” es un proceso hidrometalúrgico, inventado por el español Bartolomé de Medina, era una forma industrial americana de producir plata (Ag) que dependía de la calidad del mineral de Ag para combinarse o amalgamarse con el azogue (Hg), lo cual transformó la minería y el curso del Nuevo Mundo y Europa, siendo la innovación más importante en América antes de 1800. Este método dependía de un ingrediente clave, el azogue, cuyo suministro escaseaba, especialmente en México, ya que era traído desde Almadén, además de ser un producto difícil de transportar a largas distancias y fácilmente vaporizable (F. Lang, 1999).

El proceso de amalgamación consistía en moler el mineral finamente, empapararlo de salmuera concentrada, añadir cinabrio y mezclarlo muy bien, repitiendo el mezclado todos los días por varias semanas, cada día se tenía que tomar una porción de la pasta del mineral formada y examinarla, observando si el Hg era brillante y reluciente, ya que con el tiempo éste debía oscurecerse debido a la descomposición de los minerales de Ag por acción del cloruro de sodio (NaCl) presente, hasta que la Ag formara una aleación con Hg se debía separar la amalgama pastosa del mineral lavándola con agua, calentándola en una retorta y separando el Hg para obtener la Ag.

Los antiguos griegos sabían que la  $\text{Ag}^0$  o el cloruro de plata (AgCl) encontrado como el mineral clorargirita, formaba una amalgama con Hg. Por el contrario, el mineral de sulfuro de plata ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ) encontrado en las minas no contenía cobre (Cu), por esa razón el proceso de amalgamación estaba condenado a fracasar. Medina tropezó con un proceso hidrometalúrgico llamado lixiviación clorurante, en éste, los minerales de sulfuro son oxidados por una sal de cobre a sulfato en la presencia de iones cloruro, (reacción 1 y 2). Así, el cloruro de plata formado reacciona con mercurio para formar plata metálica (reacción 3), que posteriormente forma la amalgama con mercurio (reacción 4).





En el caso de Bartolomé de Medina, el AgCl fue apropiado para amalgamación por Hg, mientras que el catalizador cobre se reactivó por oxidación al aire libre, lo cual explica la necesidad de agitación continua del lodo en el patio. Sin cobre, el mineral de sulfuro no puede ser oxidado y, por consiguiente, el cloruro de plata no puede formarse, sin importar cuanta sal contenga la salmuera. Aunque este proceso permitió una gran producción de plata, generó también una gran contaminación del suelo con mercurio que continúa hasta nuestros días (Ramírez, 2006).

En la época colonial este método sustituyó ampliamente a la fundición por ser mucho más barato y fue reemplazado en 1910 por el proceso de cianuración, técnica no sólo mucho más económica, sino también más rápida, haciendo posible el refinado de minerales diez veces menos ricos que los que se sometían al método de patio.

Algunos metales liberados durante estos procesos, como el Hg, son elevadamente tóxicos o peligrosos, muchas veces los mineros desconocen sus peligros. Los mineros, sus familias y comunidades corren el riesgo de sufrir intoxicación por Hg, las poblaciones que viven en la zona de las actividades de extracción, en sus inmediaciones, río abajo o a sotavento de esa zona, están expuestas a graves peligros ambientales y de salud a largo plazo. El almacenamiento, transporte y manejo del Hg crea oportunidades para que se produzcan derrames y para que las personas queden expuestas a contaminación por éste (OPS-OMS, 2011).

## **CAPÍTULO III**

### **3. MARCO TEÓRICO**

#### **3.1. Historia de la minería en México**

El sector minero ha sido de gran importancia en la historia de México, debido a la diversidad y abundancia de los minerales que se encuentran en la naturaleza. La Minería tiene sus antecedentes desde los tiempos prehispánicos y en la colonia, así como en la primera mitad del siglo XIX, y está configurado por tres grandes momentos históricos: El Porfiriato, periodo en el que se definen sus componentes principales en una nueva fisonomía para las actividades mineras de México; del Movimiento Revolucionario de 1910 a la Constitución de 1917, que establece las bases jurídicas que hablan de normar la orientación de la minería durante este siglo; y la crisis de 1929, que afectó severamente la minería mexicana y puso en evidencia la necesidad de contar con instituciones e instrumentos para llevar adelante una política nacionalista de fomento a esta actividad.

La bonanza de la minería se registró en los dos últimos años del siglo XIX y primeros del XX, después de un largo periodo de estancamiento. En 1907, la crisis económica Norteamericana se extiende hasta México afectando especialmente a la minería. Para 1929, la minería continuaba siendo una de las industrias más importantes del país (Muro, 2005). La minería ha contribuido al desarrollo industrial de México, pues los minerales se utilizan como materias primas en gran número de ramas industriales, entre las que destacan la petrolera, la siderúrgica, la química, la electrónica, la del vidrio, la cerámica y la de la construcción. México se sitúa en un lugar destacado en la producción mundial de metales y minerales.

En 1995 México ocupó el primer lugar en la producción de celestita y plata; el segundo en bismuto, fluorita y sulfato de sodio; el cuarto en arsénico y grafito; el quinto en cal, plomo y barita; el sexto en zinc, antimonio y molibdeno; el séptimo en sal y cadmio; el noveno en manganeso, azufre y yeso; el décimo en cobre, y el decimoquinto en oro. De esta forma, en el mercado mundial de metales y minerales, la competitividad depende de la ubicación, la disponibilidad de materia prima, la seguridad de suministro y, de manera fundamental, de la infraestructura física y de la base humana e institucional (CMM, 2015).

México tiene un importante potencial minero no explotado que constituye su ventaja primordial para el desarrollo de un sector minero competitivo a nivel mundial. El territorio nacional cuenta con ricos depósitos de minerales metálicos, como: la región argentífera, que comprende parte de los estados de Aguascalientes, Chihuahua, Durango y Guanajuato; la región con presencia de Au, Cu y Mo, que abarca los estados de Sonora, Sinaloa y Nayarit; la región rica en Pb, Zn y Ag, que cubre parte de los estados de Chihuahua, Coahuila, Zacatecas, Baja California Sur y San Luis Potosí; y, la región con importantes depósitos de Fe, que se extiende por la Costa del Pacífico, en los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Durango. Por otra parte, deben señalarse los estados de Coahuila, Puebla, Querétaro y Baja California Sur, pues disponen de importantes depósitos de minerales no metálicos. En particular, la región carbonífera de Sabinas en el estado de Coahuila representa un activo de primera importancia. Además, existen amplias extensiones del territorio nacional que tienen probabilidades de contener sustancias mineras, que aún no se han explorado suficientemente (Muro, 2005).

### ***3.1.1. La minería del mercurio***

Por sus propiedades físicas y químicas únicas, y por haber sido identificado como sustancia tóxica persistente y bioacumulable (STPB), el Hg es desde hace casi cuatro décadas causa de preocupación en la mayoría de los países desarrollados, preocupación que se ha traducido en estrategias que comprenden investigación científica, desarrollo de marcos legales, programas de reducción de emisiones, iniciativas de recolección y reciclaje de productos con contenido de Hg y advertencias sobre el consumo de alimentos relacionadas con la ingesta del metal.

A pesar de los riesgos que puede representar el Hg como mercancía continúa teniendo una importante oferta en el mercado mundial, el metal tiende a venderse en países en desarrollo, donde se utiliza en la extracción artesanal de oro u otros metales como la plata, o en usos no esenciales. Entre las propiedades que hacen del Hg una sustancia de preocupación figuran su capacidad para transportarse en la atmósfera a grandes distancias, gracias a su volatilidad y larga vida (de seis meses a dos años); su capacidad de bioacumulación en cadenas alimentarias acuáticas, y su capacidad para transformarse en compuestos más tóxicos (Castro, 2011).

Se contempla que las posibles reservas de Hg en México están distribuidas en la siguiente forma: producción secundaria de antiguos jales en el estado de Zacatecas, en el estado de San Luis Potosí existen antiguos jales mineros que no se han cuantificado, minas de Hg primario en el estado de Querétaro y reservas en la industria cloro alcalina. La estimación de las posibles reservas mexicanas de Hg secundario y primario, así como de la factibilidad de su extracción, precisa una cantidad mayor que la demanda mundial de acuerdo con el Informe sobre la oferta, el comercio y la demanda de este metal (PNUMA, 2010).

Por otra parte, surgieron dos factores importantes que influyeron en el mercado mexicano del Hg, generando cambios en la escena mundial. El primero fue la reducción gradual de las exportaciones del metal como producto básico hasta su eliminación total en el año 2011, en conformidad con una propuesta de la Comisión de las Comunidades Europeas (CE). El segundo es la Ley que prohíbe la exportación de Hg de Estados Unidos desde el 2008, la cual establece que las dependencias federales no pueden transferir Hg<sup>0</sup>; prohibiendo así la exportación de este elemento desde el 1° de enero de 2013 y exigiendo al Departamento de Energía estadounidense designar y administrar una instalación para almacenar Hg a largo plazo a partir del 1 de enero de 2010. Por estos factores y considerando que Estados Unidos ha sido el principal proveedor de Hg de México, se ha incrementado la producción de Hg secundario, así como la producción de Hg primario de manera informal y el fomento tanto de establecimientos de reciclaje de Hg, como la importación legal o ilegal de productos gastados con Hg para su reciclaje (Castro, 2011).

### ***3.1.2. Panorama minero del estado de Querétaro***

#### **a) Geografía**

El estado de Querétaro forma parte del extenso territorio de la República Mexicana; se encuentra en el centro del país, conformado en su mayor parte por sierras y lomeríos, tanto de origen volcánico como sedimentario. Se localiza en una zona donde coinciden tres regiones naturales: en el centro y sur el Eje Neovolcánico Transversal, al norte la Sierra Madre Oriental y al centro oeste la Altiplanicie Mexicana (Figura 3.1). La entidad queretana ocupa una superficie de 11 769 km<sup>2</sup> que lo ubican en el lugar 26 entre los 32 estados de la República. Querétaro limita con los siguientes estados: San Luis Potosí al norte, Hidalgo al este, México al sureste, Michoacán al suroeste y Guanajuato al oeste.

El estado tiene carreteras troncales, ramales, secundarias y particulares, que dan acceso a los 18 municipios: Amealco de Bonfil, Pinal de Amoles, Arroyo Seco, Cadereyta de Montes, Colón, Corregidora, Ezequiel Montes, Huimilpan, Jálpan de Serra, Landa de Matamoros, El Marqués, Pedro Escobedo, Peñamiller, Querétaro, San Joaquín, San Juan del Río, Tequisquiapan y Tolimán (INEA, 2014).

**Figura 3.1 Orografía del Estado de Querétaro**



Fuente: INEGI, Síntesis Geográfica del Estado de Querétaro, 1998.

Realizado por: Isela Martínez Fuentes.

### **b) La minería como sector económico**

Se tienen evidencias de actividad minera en la Sierra Gorda desde épocas lejanas. En el siglo XIII a. C. se realizaron explotaciones a cielo abierto y subterráneas; alrededor del siglo X a. C. para la producción de cinabrio, el cual era utilizado para rituales; posteriormente las minas estuvieron sujetas a intensos trabajos para extraer además del cinabrio, otros metales como: plata, fluorita y calcita verde utilizados como material de ornato, para la explotación aplicaban métodos similares a los de hoy, conocidos como “rebajes abiertos” y “corte y relleno” (INEA, 2014).

La minería en el estado de Querétaro se considera tradicional. Durante la época del virreinato y en los primeros años de vida independiente, Querétaro tuvo una participación importante en la actividad minera del país, pues era el paso obligado que unía la capital de la Nueva España con los reales de minas de Zacatecas y Guanajuato. Además se descubrieron grandes yacimientos de plata y plomo que condujeron a la fundación de pueblos mineros como San Pedro Escanela, El Doctor, San José de Amoles (actualmente Pinal de Amoles), Río Blanco, Plazuela, San Joaquín y Maconí, en los que además de obtener Hg del cinabrio, lo utilizaban en la extracción de plata por medio del método de patio (SGM, 2014).

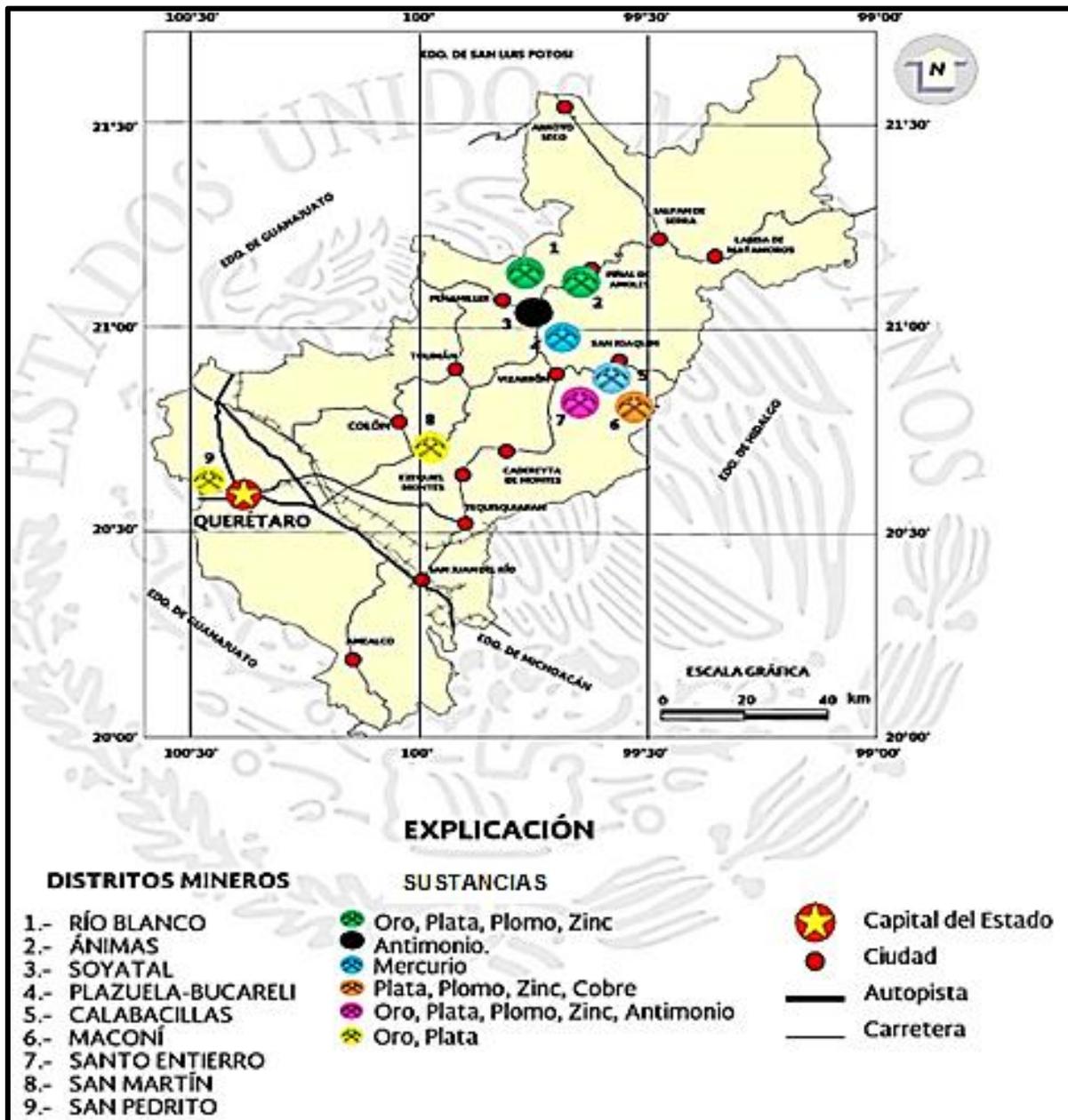
Conforme al Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2014), el estado de Querétaro se ha dividido en 9 regiones mineras, las cuales se han agrupado de acuerdo con su importancia, tipo de mineralización y a la forma en que se observan los minerales en los distritos mineros más importantes (Tabla 3.1), tanto para minerales metálicos (Figura 3.2) como para los no metálicos.

**Tabla 3.1 Regiones mineras del estado de Querétaro**

Región minera	Zona o distrito minero	Sustancia
<b>Minerales metálicos</b>		
<b>I. Pinal de Amoles</b>	1. Ánimas 2. Río Blanco 3. El Soyatal 4. Plazuela 5. Bucareli	Au, Ag, Pb, Zn, <b>Hg</b> , Sb
<b>II. San Joaquín</b>	6. Maconí 7. Santo Entierro 8. San Juan Nepomuceno 9. Calabacillas	Ag, Pb, Zn, Cu, Au, <b>Hg</b>
<b>III. Bernal</b>	10. San Martín 11. San Antonio	Au, Ag
<b>IV. Querétaro</b>	12. San Pedrito	Au, Ag
<b>Minerales no metálicos</b>		
<b>V. Cadereyta</b>	1. Mármoles vizarrón	Mármol, CaCO <sub>3</sub>
<b>VI. Bernal</b>	2. Caleras y rocas dimensionables	Calizas
<b>VII. Colón</b>	3. Opalífero: Tequisquiapan 4. Caolín: Ezequiel Montes	Ópalo, Caolín, Sillar
<b>VIII. Querétaro</b>	5. Materiales de ornato 6. La cañada	Canteras
<b>IX. Amealco</b>	7. Amealco	Rocas dimensionables y sillar

Fuente: Servicio Geológico Mexicano, 2014.

Figura 3.2 Distritos mineros metálicos en el Estado de Querétaro



Fuente: Servicio Geológico Mexicano, 2014.

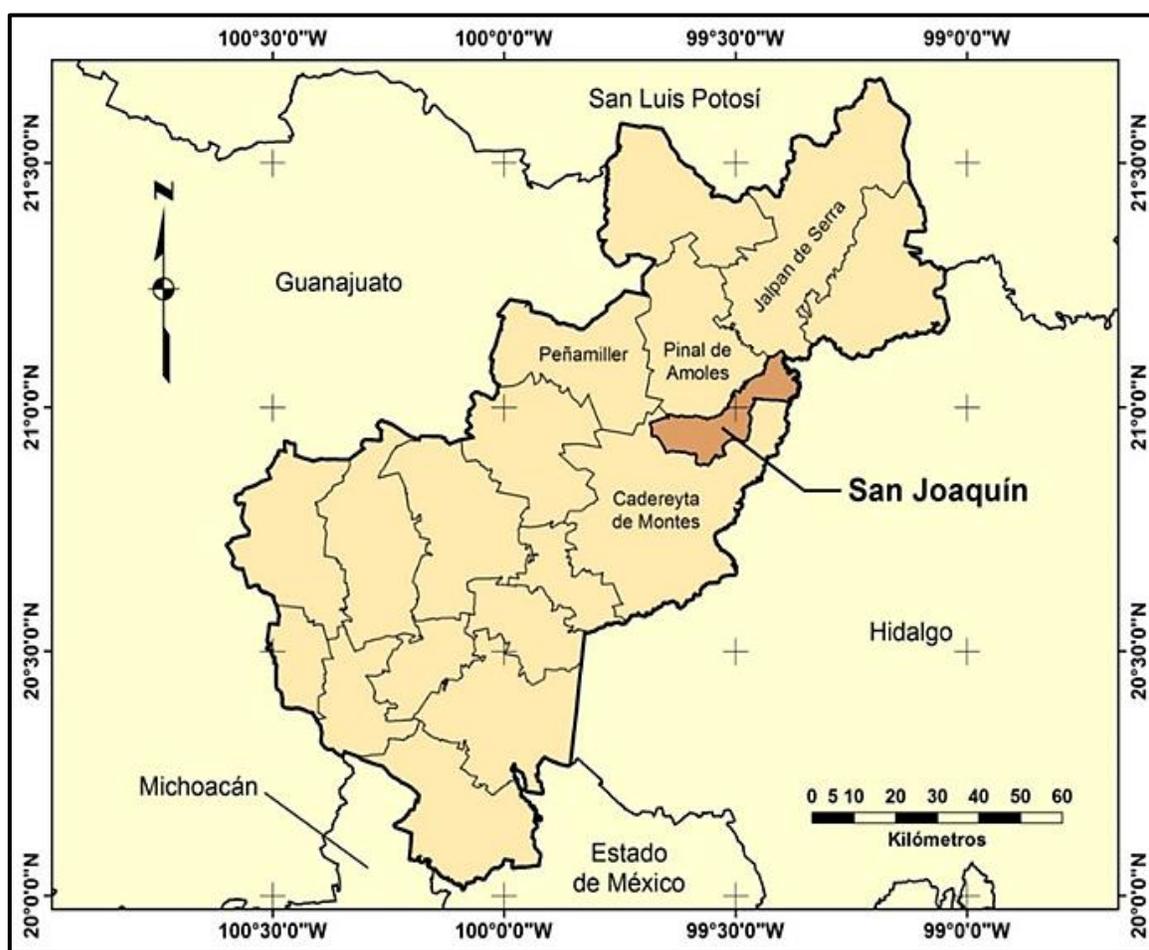
### 3.1.3. San Joaquín, Querétaro; región minera

En nuestro país la producción de Hg proviene de yacimientos que se localizan principalmente en los estados de San Luis Potosí, Querétaro y Guerrero. Los más importantes, sin embargo, han sido los de la Sierra Gorda Queretana, particularmente los de la región de San Joaquín, una de las nueve regiones mineras en las que se divide el estado de Querétaro, donde se han censado numerosas minas grandes y pequeñas,

modernas, coloniales y prehispánicas (Martínez, et al., 2013). La explotación del Hg en esta región se remonta a tiempos prehispánicos, en los que las civilizaciones mesoamericanas valoraban mucho sus cualidades metálicas únicas; su uso en ese entonces era meramente ornamental y constituía una fuente fundamental de ingresos para la economía local.

La región de San Joaquín está ubicada al sur de la Sierra Gorda de Querétaro. Es uno de los 18 municipios que forman esa entidad. Tiene una superficie de 212 km<sup>2</sup>, que representan aproximadamente 1.8 % de la superficie estatal. Se localiza entre los 20° 51' 36" y los 21° 03' 33" de latitud norte y entre los 99° 27' 28" y 99° 38' 25" de longitud oeste, en el centro-noreste del estado. Colinda, al noroeste, con el municipio de Pinal de Amoles; al norte, con Jalpan de Serra, y al poniente y sur con Cadereyta de Montes, que pertenece a la cuenca hidrológica del río Moctezuma (Figura 3.3).

**Figura 3.3 Ubicación de la región de San Joaquín**



Realizado por: Miguel Ángel Flores Espinoza, Instituto de Geografía.

En San Joaquín se han registrado actividades relacionadas con la explotación y manejo del cinabrio desde el siglo IV. A partir de 1930 y especialmente en las décadas de los años cincuenta y sesenta del siglo XX, se presentó una bonanza en la producción primaria de Hg, y esta entidad se convirtió en el primer productor nacional de ese metal (Carretero, 2007).

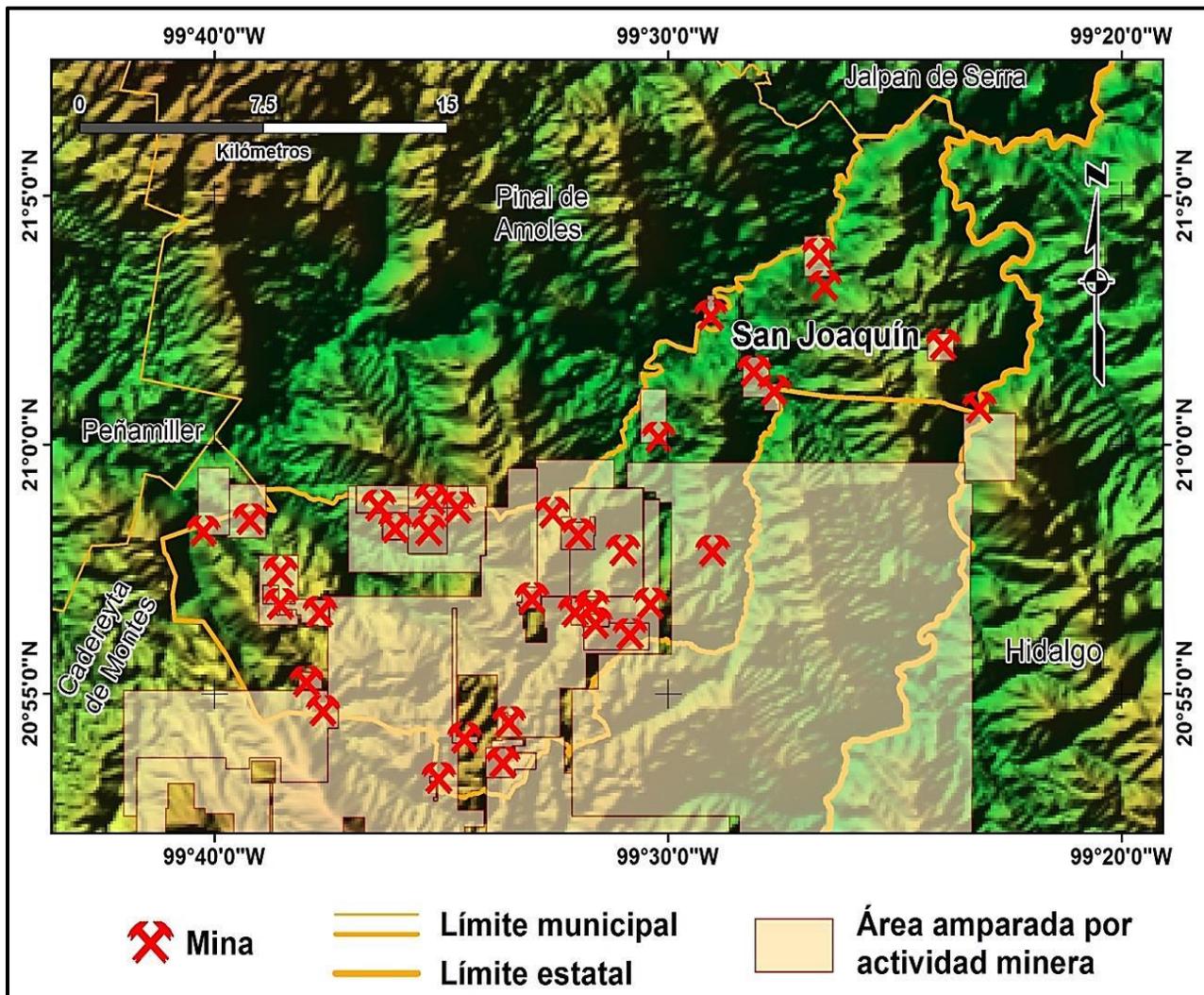
El auge de la región de San Joaquín fue entre los años 1954 y 1976 en el que llegaron a trabajar más de cien minas. Esto fue una combinación de riqueza mineral y una fuerte demanda impulsada por la carrera armamentista de Estados Unidos durante la década de los sesenta.

#### **a) Yacimientos minerales en San Joaquín**

El municipio de San Joaquín cuenta con dos distritos mineros: Santo Entierro - San Juan Nepomuceno y Calabacillas. Los yacimientos del distrito de Calabacillas son de tipo hidrotermal y el de Santo Entierro - San Juan Nepomuceno, del tipo skarn. En esta zona se manifiestan dos tipos de mineralizaciones: una de donde se extraen, entre otros, metales preciosos como el Au y la Ag, representado por los yacimientos de Santo Entierro - San Juan Nepomuceno; otra donde se ha extraído el HgS cuyo prototipo es el yacimiento de Calabacillas. Ambos tipos de yacimientos están relacionados con el magmatismo cenozoico de la región.

La mineralización del HgS, mena principal del Hg, está alojada en fallas y fracturas, formando vetas de diversos tamaños y en varias direcciones. En el distrito son numerosas las minas grandes y pequeñas que han sido explotadas (Figura 3.4), muchas de ellas desde la época prehispánica (Álvarez, 2013).

Figura 3.4 Yacimientos minerales de Hg



Realizado por: Miguel Ángel Flores Espinoza, Instituto de Geografía.

### b) Extracción actual de mercurio en San Joaquín

En la actualidad el proceso informal de producción de Hg, consiste en triturar el cinabrio y cocerlo en un horno artesanal hecho de tubos de acero y ladrillos de adobe. Los hornos que se emplean actualmente en la región de San Joaquín consisten en una serie de tubos de 8 a 12 pulgadas de diámetro colocados dentro de una cámara de calentamiento (Figura 3.5), donde se aplica desde abajo el calor proveniente de la quema de combustibles. El mineral triturado se coloca dentro de los tubos llenándolos un poco menos de la mitad; se coloca una tapa de ladrillo que se sella con barro para evitar fugas de calor. Del lado opuesto de la tapa se encuentran los denominados tubos de condensación, cuyo diámetro es menor al de los tubos de carga (5 - 6 pulgadas de diámetro); estos tubos se colocan en

posición inclinada, de tal forma que desembocan en una cámara de condensación, en donde el vapor de Hg es condensado con el aire ambiente en una vasija, generalmente de barro, aunque, en procesos más rudimentarios, la vasija puede ser incluso de plástico.

**Figura 3.5 Hornos artesanales y tubos de condensación para la extracción de Hg**



La carga del horno artesanal va desde los 100 kg hasta los 240 kg de cinabrio. El combustible empleado es principalmente leña, aunque también se usa a veces aceite quemado y gas. El proceso de cocción dura entre 8 y 10 horas. Los hornos no cuentan con una chimenea para la salida de los gases, los cuales migran al exterior por una apertura de 20 cm aproximadamente, hacia cualquier dirección de acuerdo con las condiciones meteorológicas prevaletientes en la región al momento del proceso. Aunque los trabajadores de las minas visitadas indican que las temperaturas de cocción son de 300 a 400 °C, los hornos deben alcanzar temperaturas mayores de 540 °C, que es la temperatura a la cual el Hg se evapora. A veces, el combustible se mezcla con cal para hacer más eficiente la combustión; para una carga de 100 kg de cinabrio, se puede usar entre 5 y 8 kg de cal.

Actualmente se ha logrado invertir en proyectos con hornos ecológicos para el beneficio del Hg y esto ha sido gracias a la unión de los trabajadores y al apoyo de organismos gubernamentales (Manifestación de Impacto Ambiental, Modalidad Regional, Actividad Minera en los Municipios de San Joaquín y Cadereyta de Montes en el Estado de Querétaro, Enero 2012).

### c) Minas artesanales

Las fuentes de emisión de Hg provenientes de las minas que se tienen localizadas en San Joaquín y municipios aledaños se presentan en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Localización de minas artesanales de mercurio**

	<b>NOMBRE LOTE</b>	<b>CONDICIÓN</b>	<b>MUNICIPIO</b>
1	Fátima	Vigente	San Joaquín
2	Ampliación Sagrada Familia	Vigente	Cadereyta de Montes
3	Diana I	Vigente	Cadereyta de Montes
4	La Banda del Zorro	Vigente	San Joaquín
5	María Estrella	Vigente	San Joaquín
6	San José Carrizal	Vigente	San Joaquín
7	Aurcana I, fracción 2	Vigente	Cadereyta de Montes
8	Aurcana I fracción 3	Vigente	Cadereyta de Montes
9	Aurcana II	Vigente	Cadereyta de Montes
10	La Paloma	Vigente	San Joaquín
11	El Zorro	Vigente	San Joaquín
12	Plomosa 2	Vigente	San Joaquín
13	San Juan IV	Vigente	Cadereyta de Montes
14	Juan Minero	Cancelado	Cadereyta de Montes
15	Plomosa	Vigente	Pinal de amoles
16	Los Alcones	Vigente	San Joaquín
17	La Perla	Vigente	San Joaquín
18	Punto Hondo	Vigente	San Joaquín
19	Maconí	Vigente	Cadereyta de Montes
20	Sagrada Familia	Vigente	Cadereyta de Montes
21	Gavilán	Vigente	San Joaquín
22	Las vírgenes	Vigente	Pinal de amoles
23	Yonthe fracción A - R1	Vigente	Cadereyta de Montes
24	Tres amigos	Vigente	San Joaquín
25	San Antonio	Vigente	San Joaquín
26	San Alejandro	Vigente	San Joaquín
27	Fracción de San Alejandro	Vigente	San Joaquín
28	Poder de Dios	Caduco	San Joaquín
29	Santo señor de Chalma	Caduco	San Joaquín
30	Apremio N	Caduco	San Joaquín
31	El peñón, fracción I	Caduco	San Joaquín
32	El peñón, fracción II	Caduco	San Joaquín
33	Ática	Caduco	San Joaquín

34	Rincón de los azogues	Caduco	San Joaquín
35	Niño de Atocha	Caduco	San Joaquín
36	Fresno	Caduco	San Joaquín
37	Salamina	Caduco	San Joaquín
38	Rosario	Caduco	San Joaquín
39	Poder de Dios	Caduco	San Joaquín
40	Maravilla	Caduco	San Joaquín
41	Santa	Caduco	San Joaquín
42	Ampliación N. 1 La Esperanza	Caduco	San Joaquín
43	La O	Caduco	San Joaquín
44	Atenea	Caduco	San Joaquín
45	Libertad	Caduco	San Joaquín
46	La Peñita	Caduco	San Joaquín
47	Águila dorada	Caduco	San Joaquín
48	Ranas	Caduco	San Joaquín
49	Yonthe fracción B	Caduco	San Joaquín
50	Yonthe fracción E	Caduco	San Joaquín
51	Ampliación II, mina de los pobres	Caduco	San Joaquín
52	La Barranca Honda	Caduco	San Joaquín
53	La Inspiración	Caduco	San Joaquín
54	Milenio 3	Caduco	San Joaquín
55	Ampliación, mina de los pobres	Caduco	San Joaquín
56	Sur	Caduco	San Joaquín
57	Mina de los pobres	Caduco	San Joaquín
58	Bartolo	Caduco	Cadereyta de Montes
59	Zimapence no. 1	Caduco	San Joaquín
60	Santo niño	Caduco	San Joaquín
61	Primera ampliación, San Alejandro	Caduco	San Joaquín
62	Los Gavilanes	Caduco	San Joaquín
63	El Divisadero	Caduco	San Joaquín
64	La Sonia	Vigente	San Joaquín
65	La Liga	Vigente	San Joaquín
66	Los Banquitos	Vigente	San Joaquín
67	La Mora	Vigente	San Joaquín
68	La Tranca	Vigente	San Joaquín
69	Morelos	Vigente	San Joaquín
70	Soyatal	Vigente	San Joaquín
71	El Mono	Vigente	San Joaquín
72	Cristo Rey	Vigente	San Joaquín
73	Todos Santos	Vigente	San Joaquín
74	San Cristóbal	Vigente	Cadereyta de Montes
75	Las Calabacillas	Vigente	San Joaquín
76	La Maravilla	Vigente	San Joaquín
77	La Pequeña	Vigente	San Joaquín
78	La Barranca	Caduco	San Joaquín
79	La Lana	Vigente	San Joaquín
80	San Juan	Vigente	San Joaquín
81	La Poza	Vigente	San Joaquín
82	San Juan Nepomuceno	Vigente	San Joaquín
83	Otatal	Caduco	San Joaquín

De las anteriores, las minas *El Rosario*, *Atenea*, *La Maravilla*, *La Barranca*, *La Poza*, *San Juan Nepomuceno* (*San Juan II*) y *Otatal* (marcadas en verde) se conocieron a fondo en una visita de campo, tomando muestras de cabello de los mineros que se encontraban labrando en ellas.

Los datos recopilados durante las visitas realizadas en campo indican que la producción de Hg está entre 0.6 y 1.4 kg por carga para los hornos de 100 kg, y de 1.5 a 2.5 kg por carga para los hornos de 200 y 240 kg, de acuerdo con estos datos recopilados, se estimó una producción promedio de 1.8 a 2.1 kg de Hg por carga. Asimismo, y considerando que algunos hornos son de 100 kg, 200 kg y otros de 240 kg, se asume una carga promedio en la región de 130 kg. Cabe mencionar que la mina de San Juan Nepomuceno reporta una producción promedio de 16 kg Hg por cada carga de 200 kg de cinabrio. Esta producción se explica por la alta eficiencia del horno, y por la elección de cargar solamente cinabrio de muy alto contenido de Hg. Por otro lado, la mina de Atenea reporta una producción mínima de apenas 0.4 kg por carga, lo que se explica por la poca formalidad observada en el proceso durante la visita de campo.

Dentro de las visitas y entrevistas realizadas a mineros se mencionó que actualmente la producción de Hg es mucho más baja que durante el año 2011. De acuerdo con información oral recopilada dentro de las visitas, se multiplicó la producción actual estimada de Hg por dos, para poder replicar las condiciones reportadas en el 2011.

### **3.2. Zona Metropolitana de la Ciudad de México.**

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), está integrada por 16 delegaciones del Distrito Federal y 59 municipios del Estado de México. Cuenta con una superficie de 7 718 km<sup>2</sup>, de la cual el Distrito Federal ocupa el 19 % y el 81 % restante, los 59 municipios del Estado de México. De 1992 a la fecha, la población ha aumentado más del 25 %, lo que ha provocado que la mancha urbana se vaya extendiendo a los municipios conurbados del Estado de México.

Los usos del suelo que predominan en la zona son: bosques, pastizales, matorrales, agricultura y zona urbana. Con respecto a la agricultura, las tierras de temporal son las que ocupan mayor superficie que van desde las llanuras, hasta las altas sierras. Se presenta vegetación de clima templado frío y semiárido como los bosques de oyamel, bosque de pino, bosque de encino, matorral, pastizal, agrupaciones halófilas y vegetación acuática (INEGI, 2007).

### **3.2.1. Calidad del aire de la ZMCM**

En condiciones naturales el aire está compuesto principalmente por nitrógeno (78 %), oxígeno (21 %) y pequeñas cantidades de otros gases (1 %), sin embargo, existen lugares sobre todo en las grandes urbes como la Ciudad de México, donde su composición ha sido alterada o contaminada con sustancias químicas y polvo, provenientes en su mayoría del uso desmedido del automóvil, del funcionamiento de las fábricas y de los suelos carentes de cubierta vegetal, asfáltica u otro recubrimiento, así como de una gran variedad de actividades en donde se utilizan solventes, por lo que este aire sucio o contaminado lo respiran todas las personas que viven o visitan esta Ciudad (Mermet, 2005).

Los principales factores que determinan la calidad del aire de la ZMCM son las condiciones meteorológicas y el balance dinámico entre las emisiones contaminantes, generadas por los diferentes factores de presión (crecimiento poblacional, vehicular y de consumo energético), por ejemplo: la limpieza del hogar, el arreglo personal y otras actividades en las que se utilizan productos que contienen compuestos tóxicos, los cuales son liberados a la atmósfera resultando nocivos para la salud, así como la capacidad atmosférica de dicha zona para eliminar o reducir la carga de emisiones. A esto se suman factores adversos como la elevada altitud a la que se encuentra, que provoca una menor eficiencia en los procesos de combustión; el relieve orográfico de la zona que no permite la dispersión de los contaminantes; la intensa radiación solar que recibe debido a su latitud tropical, que promueve una mayor reactividad para la formación de contaminantes secundarios. Además de lo anterior, se debe considerar que las emisiones contaminantes del aire no se pueden contener en las zonas limítrofes de cada entidad (SEDEMA, 2012).

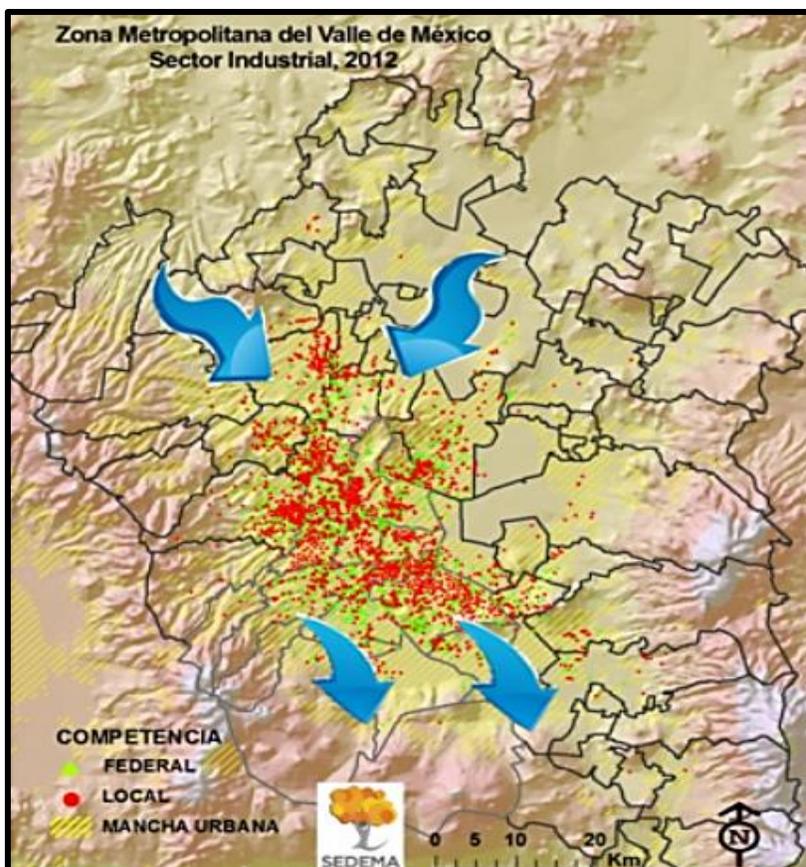
#### **a) Actividades industriales**

A principios de los años noventa, la gravedad del problema de la calidad del aire de la ZMCM, tuvo como consecuencia que las industrias más contaminantes como las fundidoras y la Refinería 18 de Marzo, entre otras, dejaran de operar o se trasladaran fuera de la Ciudad; a pesar de esto, siguen asentadas un gran número de industrias que además de aportar bienes, servicios y empleos a la ciudadanía, también son una fuente importante de generación de contaminantes atmosféricos y de compuestos de efecto invernadero.

De acuerdo con el Sistema de Consulta de los Censos Económicos 2012 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), se identificó que existían 30 934 establecimientos industriales en el Distrito Federal y 33 807 en los 59 municipios del Estado de México que forman parte de la ZMCM. Al realizar un análisis de los establecimientos manufactureros con potencial generador de emisiones a la atmósfera, se determinó que de los 64 741 reportados por los Censos del INEGI en la ZMCM, aproximadamente 30 881 de ellos son generadores de emisiones contaminantes y de efecto invernadero.

La aglutinación de las principales industrias y los vientos dominantes que provienen de la zona norte de la ZMCM, ocasionan que las emisiones impacten directamente en las áreas densamente pobladas (Figura 3.6); aunado a esto y como consecuencia de una inadecuada planeación de la Ciudad, las zonas industriales que en su momento quedaban fuera del área urbana, actualmente están rodeadas de múltiples asentamientos humanos (SMA-GDF, 2012), lo que representa un riesgo para la salud de la población.

**Figura 3.6 Sector industrial y dirección del viento de la ZMCM**



**Fuente:** Inventario de emisiones de contaminantes y de efecto invernadero, 2012.

## **b) Transporte y movilidad.**

En México cada vez más personas se han trasladado a las ciudades y han ocasionado un acelerado proceso de urbanización, tal es el caso de la ZMCM, donde el rápido incremento de su población ha provocado una expansión no sustentable de la mancha urbana, resultando en la necesidad de realizar recorridos más largos en el transporte de bienes, mercancías y personas, así como en un aumento acelerado y sin control del número de vehículos automotores.

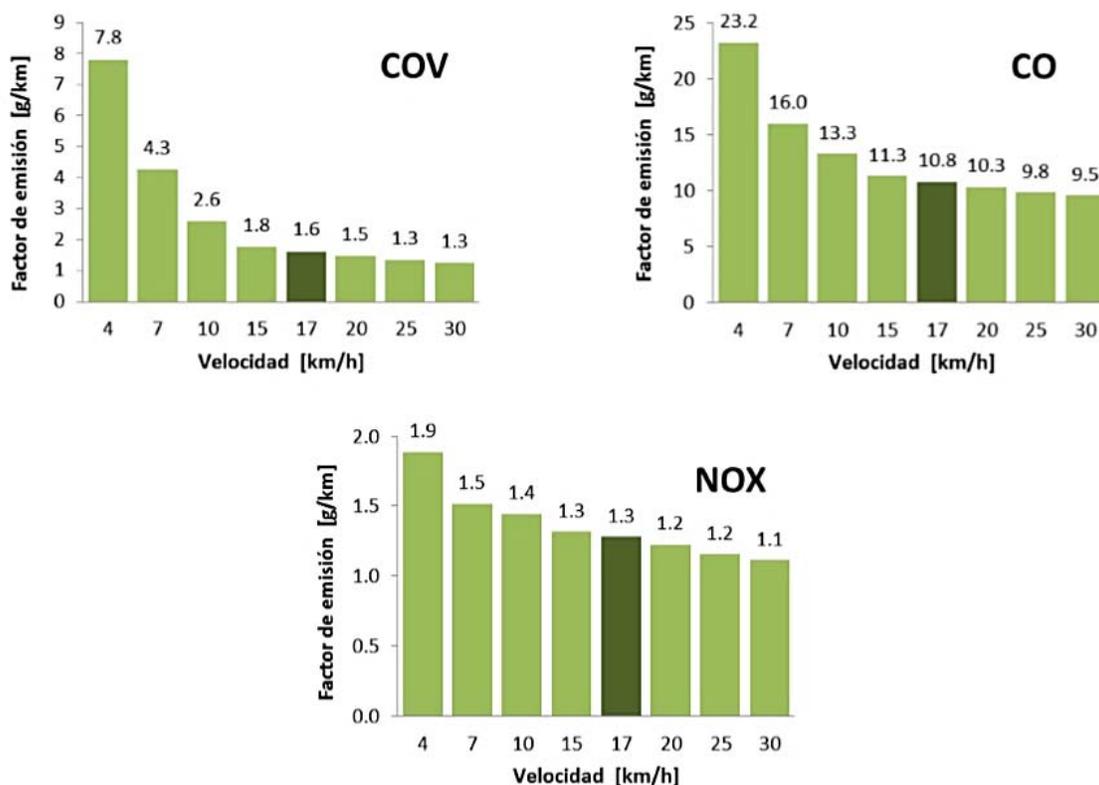
El incremento de un poco más del doble de vehículos registrados en la ZMCM en los últimos 22 años ha resultado en un aumento del tráfico, de congestionamientos viales y como consecuencia, una disminución en la velocidad de circulación. Para el año 2012, la velocidad promedio vehicular para un día normal en la Ciudad de México era de 17 kilómetros por hora (km/h) con posible tendencia a alcanzar velocidades cada vez más bajas.

En la Figura 3.7, se muestran las emisiones de autos particulares en caso de llegar a una velocidad de 4 km/h, es decir, cuando el vehículo está casi detenido, ya que es comparable a estar estacionado con el motor encendido, escenario en donde se tiene el mayor aumento de emisiones, donde los compuestos orgánicos volátiles (COV) se incrementarían de 1.6 g/km a 7.8 g/km, el monóxido de carbón (CO) de 10.8 g/km a 23.2 g/km y los óxidos de nitrógeno (NOx) de 1.3 g/km a 1.9 g/km (SEDEMA, 2012).

Respecto a los combustibles utilizados, la flota vehicular a gasolina representa el 95 % de la flota total y consume 21 millones de litros diariamente, esto equivale al 44 % de la energía que se utiliza en la ZMCM. La flota vehicular a diesel es tan sólo el 4 % y consume casi 5 millones de litros diarios, mientras que el uso de los combustibles gaseosos sigue siendo insignificante.

El transporte de carga, es un sistema esencial para la economía del país y de la ZMCM, en él intervienen varios actores que hacen que su organización sea un proceso complejo, costoso y contaminante que consume cantidades importantes de energía. Este sector además ocasiona problemas en la circulación vial, así como aumento del ruido, de emisiones contaminantes y de efecto invernadero del sector transporte (SEDEMA, 2012).

**Figura 3.7 Emisiones de autos particulares por cambio de velocidad.**



Fuente: Inventario de emisiones de contaminantes y de efecto invernadero, 2012.

### c) Contaminación doméstica por mercurio

Tanto los vehículos de combustión interna como las industrias generan gran parte de los contaminantes al aire, sin embargo, también es importante mencionar que las actividades que realizamos dentro de nuestras casas, aun las más básicas y cotidianas como el arreglo y aseo personal, la limpieza del hogar, la cocción de alimentos, entre otras, tienen una contribución importante.

Esta problemática podría ser aún mayor, debido a que no se conoce con certeza la diversidad de sustancias químicas que contienen tales productos y además, una cantidad importante de ellos se preparan dentro de pequeños establecimientos que no cuentan con sistemas de control de calidad. Otra fuente de contaminación en el hogar, es la gran cantidad de residuos (basura) que se generan en las viviendas y que posteriormente es trasladada para su disposición final a los rellenos sanitarios, los cuales además de

contaminar el aire, contaminan el suelo y el agua pertenecientes y aledaños a estos lugares.

En la Tabla 3.3 se muestra el listado de algunos productos que contienen Hg<sup>0</sup> o compuestos orgánicos de Hg; como es el caso de productos farmacéuticos y cosméticos. El riesgo de liberación de estas sustancias depende del tipo de producto, ya que se puede presentar durante la reparación, reemplazo o disposición final del equipo o cuando los aparatos son triturados o aplastados con los residuos, o bien, si se deteriora, rompe o derrama el contenido de Hg, o del envase en el transporte de ciertos medicamentos.

**Tabla 3.3 Productos con contenido de Hg**

Fuente de Hg		Productos		Cantidad de Hg
<b>Electrodomésticos</b>	Interruptores y sensores de llama	Lavarropas	Sistemas de ventilación	0,001-400 g Hg/producto
		Congeladores	Calefactores	
		Microondas	Planchas	
<b>Aparatos domésticos a gas</b>	Termostatos y termo tanques	Calentadores de piscinas y de agua		>1 000 mg Hg/producto
		Calderas	Hornos	
<b>Productos electrónicos</b>	Pantallas y monitores en lámparas de cátodo frío, tubos fluorescentes e interruptores	Cámaras	Pantallas LCD y planas	50 % de los productos de 5 a 10 mg Hg 15 % entre 10 y 50 mg Hg
		Videocámaras	Cajas registradoras	
		Fotocopiadoras	Proyectores digitales	
		Fax	Partes de sistemas de autos	
<b>Lámparas</b>	Lámparas a alta o baja presión y fuentes luminosas, de uso doméstico e industrial.	De Tubo fluorescente		5-10 mg Hg/tubo
		Fluorescente compacta		< 5 mg Hg/lámpara
		De vapor de sodio alta presión		10-50 mg Hg/lámpara
		De vapor de mercurio		10-100 mg Hg/lámpara
		De halogenuros metálicos (HM)		
<b>Pilas y baterías</b>	En celdas de batería/pilas	De óxido de mercurio		20-50 % de Hg
		De zinc/aire		hasta 1 % de Hg
		De óxido de plata		
		Alcalinas, de manganeso		0.025 % de Hg
<b>Instrumentos de medición y control</b>	Dentro de los instrumentos	Termómetros domésticos		De 50 y 1 200 mg
		Barómetros		De 5 a 620 g
		Manómetros		
<b>Productos farmacéuticos y cosméticos</b>	Compuestos orgánicos de Hg	Vacunas		49.6 % de CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> HgCl en el timerosal
		Gotas oftálmicas		Variable
		Cremas y jabones aclarantes		
		Biocidas		

Tomado y modificado de: Centro Coordinador Convenio Basilea - Centro Regional Convenio de Estocolmo para América Latina y Caribe, 2015.

### 3.2.2. Contaminantes tóxicos

El término “contaminantes tóxicos del aire” es utilizado para referirse a un grupo de compuestos químicos identificados por ser altamente nocivos a la salud humana, cuyos efectos pueden presentarse a corto o largo plazo de forma aguda o crónica, respectivamente, también se les conoce como “contaminantes peligrosos del aire”. Casi la totalidad de las emisiones de estos contaminantes provienen de los compuestos orgánicos totales (COT) y menos del 1 % en peso son metales tóxicos contenidos en las partículas suspendidas (SEDEMA, 2012).

Una fuente importante de generación de este tipo de contaminantes es la realización de actividades en las que se utilizan solventes y productos que contienen sustancias tóxicas o la quema y evaporación de combustibles fósiles.

#### ❖ Presencia y persistencia

A pesar de que el Hg no destaca entre los principales metales emitidos en la ZMCM, es reconocido como un producto químico de interés mundial, debido a su transporte a larga distancia en la atmósfera, su persistencia en el medio ambiente, su capacidad para acumularse en los ecosistemas y su efecto negativo en la salud humana y el medio ambiente. En la Tabla 3.4 se muestran las emisiones de Hg, por tipo de fuente según la entidad, en las Tablas 3.5 y 3.6 se presentan las principales actividades en las que es utilizado el Hg, observando que en la mayoría de los casos las fracciones de emisión podrían considerarse insignificantes, sin embargo, la conjunción de ellas y su acumulación a largo plazo, tanto en el ambiente como en el ser humano hacen al Hg objeto de estudio.

**Tabla 3.4 Emisiones de Hg por entidad en la ZMCM**

Emisiones de Hg [t/año]			
Entidad	Distrito Federal	Estado de México	ZMCM
Fuentes puntuales	N/S	N/S	N/S
Fuentes de área	N/S	1	1
Fuentes móviles	N/S	N/S	N/S

N/S: No significativo

Tomado y modificado: inventario de emisiones de contaminantes y de efecto invernadero, 2012.

**Tabla 3.5 Factores de emisión por actividad de producción**

Actividad	Factor de Emisión [kg/unidad]	Unidad
Producción de cloro	4.54E-03	Toneladas de cloro producido
Fabricación de asfalto	1.09E-07	Tonelada de asfalto producido
Producción de abrasivo en Grano	7.70E-07	Tonelada de grano alimentado
Fabricación de concreto premezclado	6.80E-10	Tonelada de concreto producido
Industria básica del hierro y acero	1.60E-04	Tonelada de tubería de hierro gris producida
Combustión para diesel	2.60E-09	m <sup>3</sup> de diesel quemado
Combustión para combustóleo pesado	1.40E-04	m <sup>3</sup> de combustóleo pesado quemado
Combustión para gas natural	0.0042	Millones de m <sup>3</sup> de gas natural quemado

Tomado y modificado: USEPA, 2004 [base de datos]. Factor Information Retrieval (FIRE) V. 6.25

**Tabla 3.6 Fracciones de emisión de Hg para fuentes puntuales con respecto a PM10**

Actividad	Fracción de PM10	% de PM10
Fabricación de cemento, cal, yeso y otros productos a base de minerales no metálicos	0.00001	0.001
Industrias básicas de metales no ferrosos, incluye el tratamiento de combustibles nucleares	0.00001	0.001
Fundición y moldeo de piezas metálicas, ferrosas y no ferrosas	0.00018	0.018
Fabricación de otros productos metálicos (excluye maquinaria y equipo)	0.00007	0.007
Otras industrias manufactureras	0.00018	0.018

Tomado y modificado: Particulate Matter (PM): USEPA, 2008 [base de datos]. Speciate V. 4.2 USA

### 3.3. El mercurio (Hg)

El Hg se puede clasificar en tres grupos según su forma: Hg metálico o elemental, Hg inorgánico y Hg orgánico (Figura 3.8). El Hg elemental es un metal brillante, blanco-plateado, que se presenta en forma líquida a temperatura ambiente, posee una alta densidad y es poco soluble en agua, por lo que presenta mucha capacidad de acumulación en el sedimento de los cursos de agua.

*Figura 3.8 Formas químicas del Hg: Hg metálico (azogue) y Hg mineral (cinabrio).*



Los compuestos inorgánicos, también llamados sales de Hg, aparecen cuando éste se combina con elementos como cloro, oxígeno y azufre, la mayoría de los compuestos inorgánicos de Hg son polvos blancos o cristales, excepto el sulfuro de mercurio (HgS), también conocido como cinabrio o cinabarita, que es rojo, variando a negro después de la exposición a la luz. Cuando el Hg se combina con carbono, los compuestos formados son llamados “orgánicos” u organomercuriales; hay un número potencialmente grande de estos compuestos, sin embargo, el más común en el medio ambiente es el  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ , (OPS-OMS, 2011). En la Tabla 3.7 se muestran las propiedades químicas del  $\text{Hg}^0$ , así como algunas características según la forma en la que se encuentre.

**Tabla 3.7 Propiedades químicas del mercurio**

Nombre común	Mercurio			
<b>Símbolo químico</b>	Hg (del término en desuso “hidrargirio”)			
<b>Aspecto</b>	Líquido plateado			
<b>Fuente natural</b>	En la naturaleza existe como HgS (cinabrio rojo), de arsénico (rejalgar), hierro (piritas), mixto (metacinabrio negro), de antimonio (estibina), también directamente unido a minerales de zinc, cobre, oro y plomo.			
<b>Peso atómico</b>	200.61 g/mol			
<b>Estado físico</b>	Líquido (a temperatura ambiente)			
<b>Aspecto: color y olor</b>	Plateado sin olor característico			
<b>Punto de fusión</b>	-38.87 °C			
<b>Punto de ebullición</b>	356.9 °C			
<b>Densidad</b>	13.52137 g/cm <sup>3</sup> a 25 °C			
<b>Presión de vapor</b>	0.00000277 atmósferas a 25 °C (0.000002811 bares o 0.2811 Pa)			
	0.00000852 atmósferas a 40 °C (0.000008626 bares o 0.862585 Pa)			
<b>Volumen específico del vapor saturado</b>	$31670 \frac{m^3_{vapor}}{kg_{Hg^0}}$	equivalente a:	$31.57 \frac{mg_{Hg^0}}{m^3_{vapor\ saturado\ de\ Hg^0}}$	a 30 °C
	$70260 \frac{m^3_{vapor}}{kg_{Hg^0}}$	equivalente a:	$14.23 \frac{mg_{Hg^0}}{m^3_{vapor\ saturado\ de\ Hg^0}}$	a 20 °C
<b>Tensión superficial</b>	4840 µN (484 dinas/cm), 6 veces más que la del agua			
<b>Solubilidad</b>	El Hg <sup>0</sup> es soluble en ácidos oxidantes como el HNO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc. y agua regia e insoluble en HCl. El vapor de Hg es más soluble en plasma, sangre y hemoglobina que en agua destilada o en solución salina isotónica. Su vida media en sangre es de 70 días. El Hg y los alquilmercuriales (CH <sub>3</sub> Hg <sup>+</sup> , CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> Hg) presentan gran afinidad por los grupos sulfhidrilos.			

**Fuente:** Protocolo de vigilancia y control de intoxicaciones agudas por mercurio.

### 3.3.1. Fuentes de emisión de Hg

Las formas naturales de Hg más comúnmente encontradas en el medio ambiente son: mercurio elemental (Hg<sup>0</sup>), sulfato de mercurio (HgSO<sub>4</sub>), cloruro de mercurio (HgCl<sub>2</sub>) y metilmercurio (CH<sub>3</sub>Hg<sup>+</sup>). Algunos microorganismos en procesos naturales pueden alterarlo, convirtiéndolo en CH<sub>3</sub>Hg<sup>+</sup>, éste es particularmente preocupante debido a su característico poder de bioacumulación en peces de agua dulce y salada, así como en mamíferos marinos a niveles muchas veces superiores a los encontrados en el ambiente (OPS-OMS, 2011).

El Hg presente en el medio ambiente tiene dos orígenes:

## **a) Fuentes naturales**

El Hg se libera a la atmósfera en una de las siguientes tres formas:

- Hg elemental: puede viajar largas distancias y permanecer en la atmósfera por un año pudiendo trasladarse globalmente antes de sufrir alguna transformación y finalmente precipitar sobre suelos o aguas.
- Hg unido a una partícula: puede transportarse a largas distancias.
- Óxido de Hg (conocido también como Hg gaseoso iónico o reactivo: encontrado principalmente en las formas solubles en agua, pueden depositarse a una gran distancia de la fuente dependiendo de una variedad de factores incluyendo condiciones topográficas y meteorológicas. Tanto para el Hg químicamente reactivo como para el Hg unido a partículas se citan intervalos de dispersión desde locales (100 km) hasta regionales (1 000 km). El Hg metálico puede pasar meses en estado gaseoso, por lo que se lo considera un contaminante global (PNRQ, 2007).

## **b) Fuentes antropogénicas**

Aparte del estado natural, existe un importante aporte de fuentes antropogénicas de Hg, que contribuyen significativamente con los niveles de éste en el ambiente, proveniente de la minería o su metalurgia; la aplicación en diversos procesos industriales y agrícolas, los cuales incluyen operaciones de extracción de oro u otros metales, quema de combustibles fósiles, producción de cemento, incineración de productos químicos, así como la producción de residuos urbanos y de las aguas residuales de las ciudades.

La minería contribuye con el 50 % de estas emisiones, mientras que el resto proviene de actividades industriales, como: la catálisis, el procesado en las plantas de cloroálcalis, manufactura de equipo eléctrico, pinturas, fabricación de fungicidas u otras fuentes menores como el uso en laboratorios químicos, aplicaciones en odontología, uso militar y el empleo de combustibles fósiles. Los compuestos de Hg que se fabrican para fines agrícolas pasan al ambiente cuando se aplican en forma de fungicidas sobre semillas, raíces, bulbos e incluso sobre la planta misma (PNRQ, 2007).

Aproximadamente la mitad de la producción mundial de Hg se usa en la fabricación de lámparas de vapor, tubos fluorescentes, termómetros clínicos e industriales y otros

instrumentos, como barómetros, manómetros, esfingomanómetros, lentes de telescopios, lámparas de difusión y ultravioleta, conmutadores, cátodos electrolíticos y turbinas de vapor. En cada una de estas industrias existe riesgo de exposición ocupacional. Sin embargo, desde la segunda mitad del siglo XX, el uso del Hg se ha ido dejando de lado por las graves intoxicaciones que produce y por la aparición de tecnología que va desplazándolo, pero aún su concentración en combustibles fósiles, carbón y petróleo es elevada (Ferro, 2010).

### 3.3.2. Fuentes de exposición al Hg

La exposición humana al vapor de Hg, sus sales inorgánicas, compuestos orgánicos u otros compuestos derivados de éste dan lugar a efectos característicos de cada especie sobre la salud. En la Tabla 3.8, se muestran los tipos de exposición que se pueden presentar, dependiendo de la forma química en la que se encuentre el Hg.

**Tabla 3.8 Tipos de exposición al mercurio**

Exposición	Ejemplo
<b>Alimentaria</b>	Consumo de pescados o mariscos contaminados con $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ .
<b>Ocupacional</b>	Minería; personal de salud; industrias y plantas de extracción de recursos naturales; laboratorios, entre otros.
<b>Accidental</b>	Liberación de vapores de $\text{Hg}^0$ por accidentes con artefactos o instrumentos que lo contienen.
<b>Intrínseca</b>	A partir de prácticas médicas u odontológicas.

Fuente: PNRQ, 2007.

La exposición al vapor de Hg es principalmente ocupacional, en trabajadores de minas, empresas electrónicas productoras de cloroálcalis, plásticos y fungicidas; mientras que para la población en general la fuente más importante son las amalgamas dentales. Uno de los aspectos interesantes actualmente, es la exposición crónica a estos vapores en personas que laboran en lugares poco ventilados, como minas en las que se extrae Hg o en las que se utiliza para la extracción de otros metales y en algunos laboratorios donde hay fugas de  $\text{Hg}^0$  y se volatiliza, por lo que es inhalado de forma inadvertida.

En lo que respecta a las sales de Hg, este metal se presenta en dos estados de oxidación, Hg (I) monovalente y Hg (II) divalente. Los alimentos constituyen la fuente de contaminación más importante para la mayoría de la gente, sin embargo, para ciertos segmentos de la población, el uso de cremas y jabones a base de Hg para aclarar la piel,

y el uso en medicina tradicional, conduce a una posible exposición. El cloruro mercurioso ( $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ), también conocido como calomel, aunque actualmente se utiliza como electrodo de referencia, fue usado hace algunos años como antiséptico en cremas cutáneas y como diurético. Las sales de Hg se han convertido en un problema, debido a que algunas instituciones tiran dichas sales a los cuerpos de aguas (ríos, lagos).

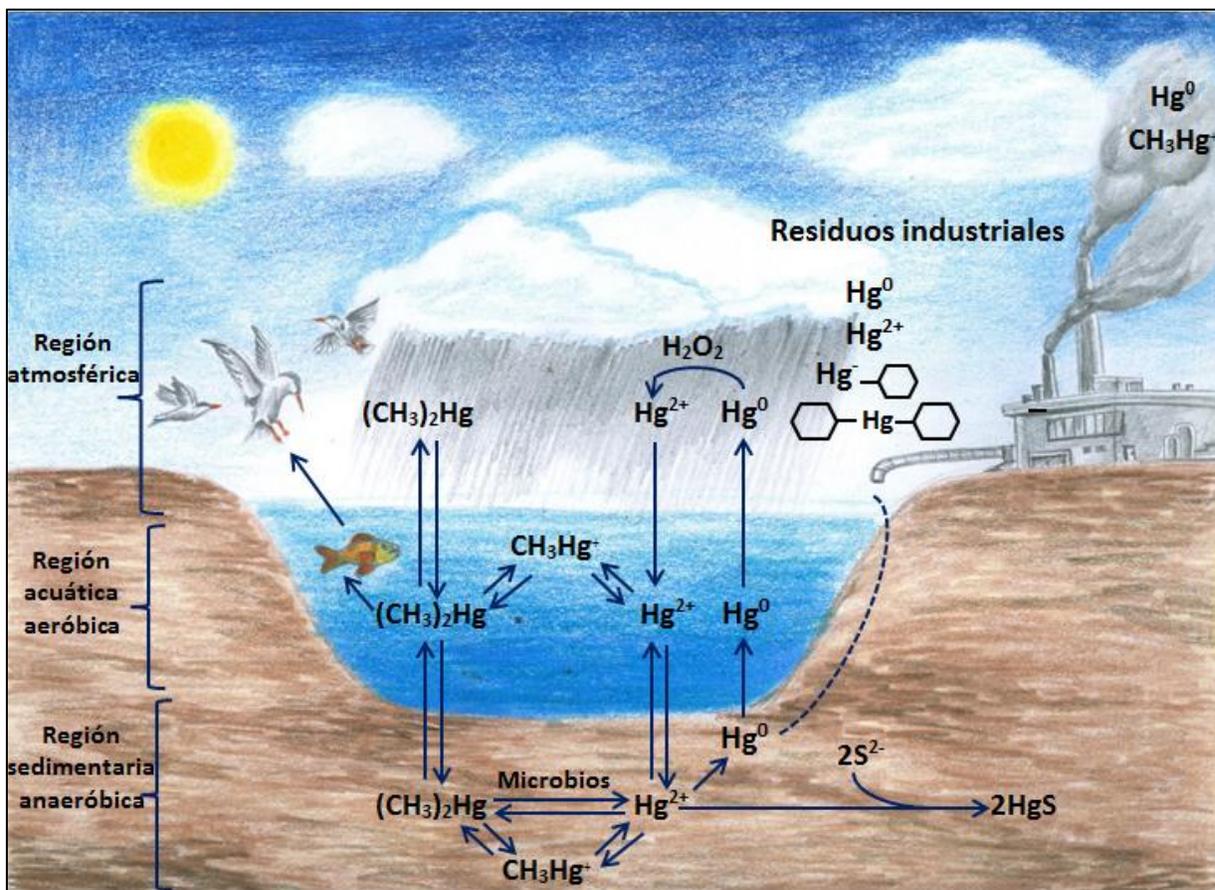
Los organomercuriales son derivados de este metal en donde se presentan enlaces covalentes con compuestos de carbono. Dentro de este grupo destacan los alquilmérgurios por su peligrosidad, siendo el  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  el representante más importante de dicha forma mercurial, el cual se puede ingerir en el consumo de semillas mal lavadas y contaminadas por este tipo de compuestos, o el consumo de carnes de animales alimentados con ellas y por pescados de lagos, ríos y mares contaminados por estos organomercuriales (PNRQ, 2007).

### **3.3.3. Ciclo biogeoquímico del Hg**

El Hg no es sólo el más tóxico de los metales, sino también el más intrigante. No se conoce que sea esencial para ningún proceso metabólico y, por tanto, se acumula en la mayoría de los seres vivos. El Hg se presenta naturalmente en una gran variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos no sólo en estado sólido, sino también disuelto en agua y, excepcionalmente, en la atmósfera debido a su alta presión de vapor (Figura 3.9).

La transición de Hg entre esos compuestos y fases es controlada por una multitud de procesos ambientales, que incluyen reacciones fotoquímicas, de oxidación y reducción química, transformaciones microbianas, etc. El Hg difiere de otros metales por su elevado carácter “orgánico”, aparece naturalmente en compuestos organometálicos y tiene una alta afinidad por la mayor parte de los tipos de materia orgánica, especialmente las proteínas de los organismos ya que los enlaces que establece son de naturaleza fundamentalmente covalente. El comportamiento biogeoquímico del Hg es complejo, y su entendimiento requiere un estudio conjunto de los procesos industriales, atmosféricos, geológicos, hidrológicos químicos, microbianos, fisiológicos y ecológicos. Además, el ciclo natural del Hg ha sido considerablemente modificado y acelerado por las actividades antropogénicas, principalmente aquellas relacionadas con la minería y la metalurgia.

Figura 3.9 Compuestos de Hg en su ciclo biogeoquímico según su fuente

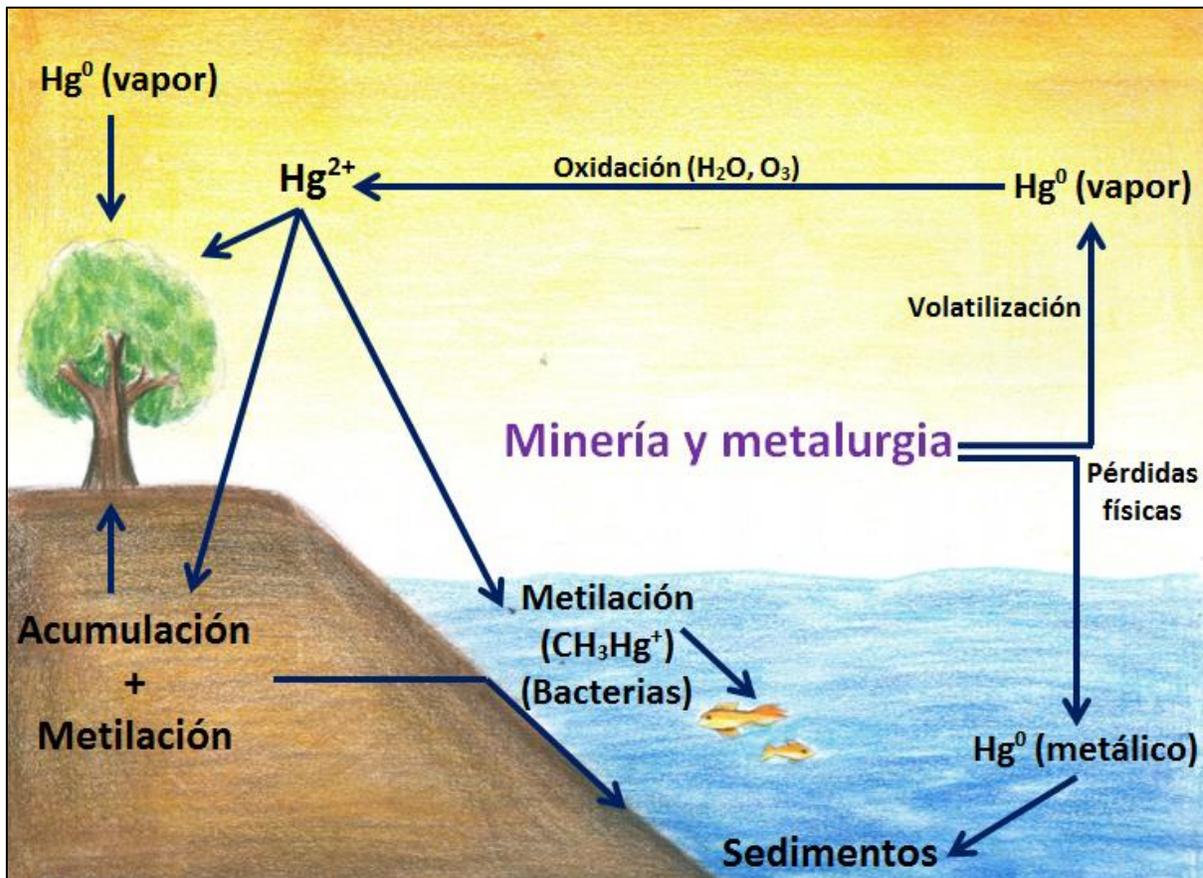


Fuente: Environmental Science and Technology, 2006.

Realizado por: Daniel Ramírez González.

Dada la elevada toxicidad que presenta este metal, el ciclo biogeoquímico del Hg (Figura 3.10) está bastante estudiado y se conoce mejor que el de otros metales, aunque todos siguen una tónica muy similar, a excepción, precisamente, del Hg, ya que puede encontrarse también en la atmósfera en cantidades apreciables. El Hg atmosférico, precisamente, puede incorporarse fácilmente a los sistemas orgánicos y al agua, por deposición. Así, el  $\text{Hg}^0$  puede depositarse en la superficie de los vegetales o ser directamente respirado por los animales. La forma  $\text{Hg}^{2+}$ , soluble en agua, puede ser depositada por la lluvia sobre el suelo y los seres vivos, y rápidamente ser absorbida por los tejidos. El principal problema es que las bacterias se detoxifican de forma natural, reduciendo la especie  $\text{Hg}^{2+}$  a  $\text{Hg}^0$  (mucho menos asimilable) o bien metilándola para dar  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ . Esto es realizado tanto por las bacterias del suelo como por las del lecho marino, pasando a una forma organometálica catiónica que es mucho mejor asimilada por los seres vivos y, por tanto, mucho más perjudicial.

Figura 3.10 Ciclo biogeoquímico del mercurio



Fuente: Environmental Science and Technology, 2006.

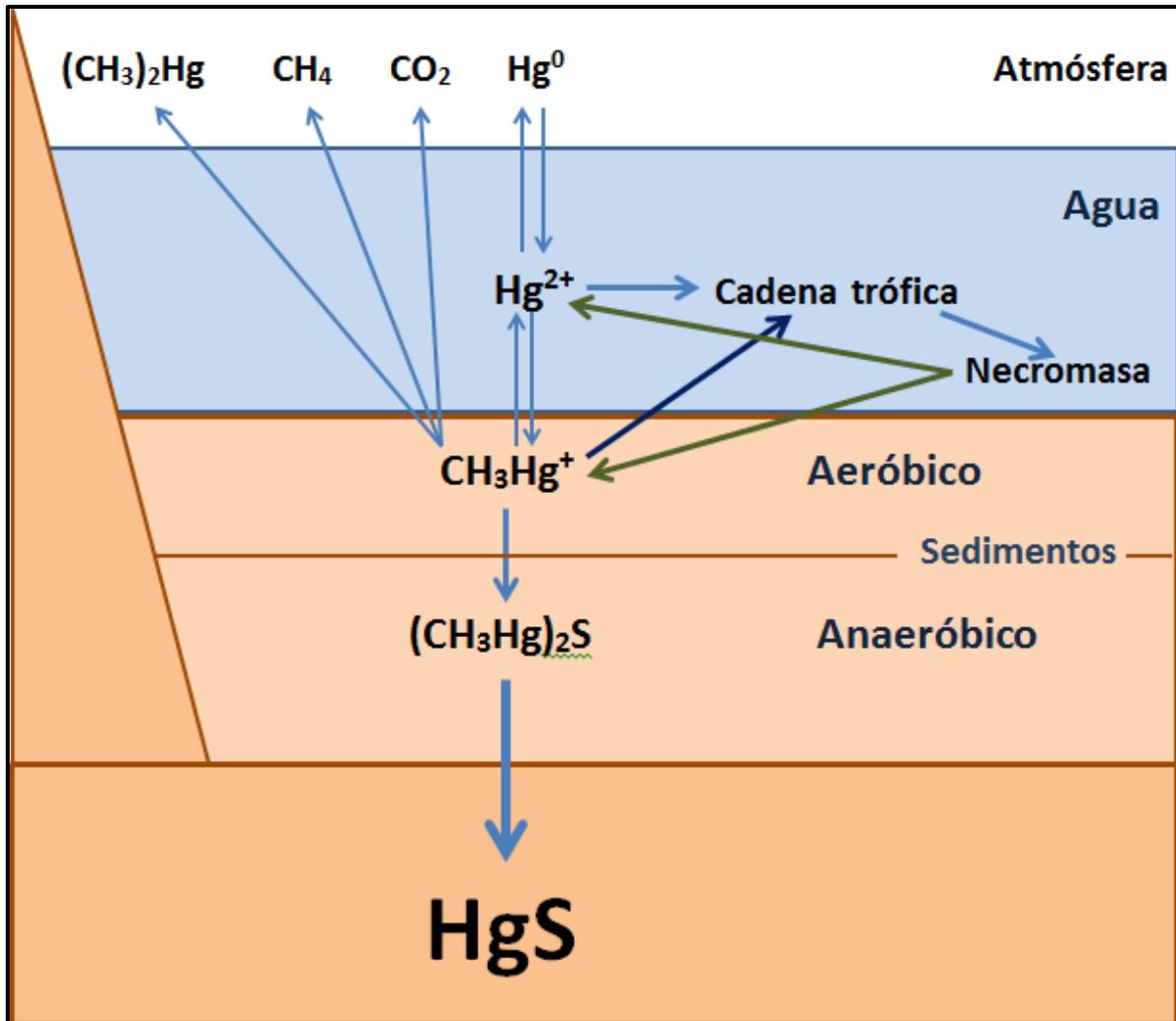
Realizado por: Daniel Ramírez González.

### ❖ Biotransformación

Éste es un proceso que involucra un cambio químico sobre el metal pesado, como por ejemplo en el estado de oxidación o la formación de un compuesto denominado (metilación). Esta transformación biológica de los metales pesados que resultan tóxicos mediada por enzimas microbianas puede dar como resultado compuestos volátiles. El ejemplo más claro es el ciclo del Hg en la naturaleza, donde la bacteria *Pseudomonas aeruginosa* puede reducir el catión  $Hg^{2+}$  a  $Hg^0$ , y donde estos organismos pueden luego metilarlo dando como producto  $CH_3Hg^+$  y  $(CH_3)_2Hg$  (Figura 3.11), que son volátiles y aún más tóxicos que el propio Hg. Estas reacciones se interpretan, precisamente, como una medida de detoxificación natural que poseen estos microorganismos, impidiendo su acumulación. La metilación del Hg, defensiva para éstos, supone un gran peligro para el

resto de especies acuáticas, ya que bajo esta forma química es fácilmente incorporado a los tejidos y, por tanto, a la cadena alimenticia.

**Figura 3.11 Biotransformaciones en el ciclo biogeoquímico del mercurio**



Fuente: Environmental Science and Technology, 2006.

Realizado por: Isela Martínez Fuentes.

La química del Hg, por su rica especiación, es muy compleja. El Hg aparece en la naturaleza en diferentes estados de oxidación y en compuestos orgánicos e inorgánicos. Puede aparecer en fase gaseosa ( $Hg^0$ ,  $(CH_3)_2Hg$ ), como líquido ( $Hg^0$ ), en fase sólida ( $HgS$ ) y en solución en una gran variedad de formas (sales mercúricas, mercuriosas y metilmercurio). En la atmósfera, el  $Hg^0$  es la forma primaria. En sedimentos, suelos mineralizados y sedimentos anaeróbicos el Hg aparece como sulfuro. En aguas naturales, los compuestos y complejos de Hg prevalecen (principalmente como hidróxidos, cloruros, o enlazados covalentemente a la materia orgánica formando complejos).

La forma dominante en animales es, generalmente,  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ . Las sustancias inorgánicas tales como cloruros, hidróxidos de hierro y sulfuros afectan el Hg acuoso al formar precipitados o formando complejos solubles estables. A diferencia de la mayor parte de los metales, el Hg forma compuestos organometálicos estables bajo condiciones naturales. Estos compuestos tienen muchas características fisiológicas y químicas que son típicas de sustancias orgánicas puras como los químicos orgánicos persistentes (DDT, PCB y Dioxina). El complejo organometálico más sencillo y abundante es el  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  que, como ya se ha mencionado, es sintetizado por diferentes microorganismos.

Así pues, el Hg difiere de la mayoría de los metales no sólo por su complejidad química, sino además por su alta afinidad por la materia orgánica, las relaciones cuantitativas con la materia orgánica se encuentra en sedimentos lacustres y marinos, en lagos, en corrientes de agua subterránea y suelos. En ecosistemas de agua dulce, la mayor parte del Hg se asocia con la materia orgánica formada por los organismos vivos, partículas de detritus y sustancias húmicas disueltas, entre los metales más abundantes en esos sistemas, el hierro, el plomo, el cobre y el aluminio muestran un comportamiento similar, pero el Hg tiene la unión más fuerte con las sustancias húmicas (ES&T, 2006). Pueden encontrarse concentraciones altas de Hg, en forma de sulfuro, en combustibles fósiles secos, los cuales se originan de la combustión incompleta de la materia orgánica degradada.

### ***3.3.4. Toxicología del Hg***

Las vías de ingreso del Hg al organismo son la dérmica, inhalatoria, parenteral y digestiva. Además de los datos de concentración y tiempo, ciertos factores biológicos a tener en cuenta en la exposición son la edad, el género, el estado fisiológico, la masa corporal, el estado de nutrición, las enfermedades preexistentes, entre otros. Por las diferentes características fisicoquímicas de las distintas formas químicas del Hg, se tienen varios procesos cinéticos y efectos tóxicos.

#### **• Mercurio metálico ( $\text{Hg}^0$ )**

La absorción de esta forma de Hg se realiza principalmente a través de la inhalación de vapores. En su estado líquido puede ser absorbido por la piel, aunque no se conoce su proporción; mientras que en el tracto digestivo no sufre una absorción significativa.

Cuando se administra por vía intravenosa, se puede observar de inmediato una embolia pulmonar, incluso sin efectos sistémicos.

La exposición a los vapores produce una alta concentración de éste en los pulmones, desde los pulmones, el  $\text{Hg}^0$  se distribuye por la sangre y se acumula en altas concentraciones en el cerebro y los riñones. También se acumula en la piel, cabello, hígado, glándulas salivales, intestino y testículos, aunque en pequeñas cantidades; atraviesa fácilmente la barrera hematoencefálica y placentaria (Galvão y Corey, 1987).

La vida media en el organismo puede variar desde pocos días hasta varios meses. Los órganos que acumulan Hg por más tiempo son el cerebro, los riñones y los testículos. La eliminación del Hg se produce en pequeñas cantidades a través de la exhalación en forma de vapores por las vías respiratorias; la mayor cantidad es eliminada a través de las heces y la orina, pequeñas cantidades se eliminan a través del sudor, la saliva, las lágrimas y el cabello. La mayor parte se excreta en los primeros 60 días; sin embargo, una pequeña cantidad de Hg acumulado en el cerebro puede tardar hasta un año en ser eliminado (Repetto, 1995).

#### • **Sales inorgánicas de mercurio**

La afinidad del  $\text{Hg}^0$  y de las sales mercuriales en el riñón se debe a la presencia en él de una proteína de bajo peso molecular, la metalotioneína, que tiende a unirse activamente con el Hg. Las sales inorgánicas prácticamente no atraviesan la barrera cerebral; sólo trazas pueden alcanzar el cerebro. La eliminación de estos compuestos se efectúa principalmente a través de las heces y secundariamente por la orina. La vida media ha sido determinada en 42 días para el 80 % de lo absorbido, en tanto que para el 20 % restante no se ha determinado (ANM, 2003 y Español, 2001).

#### • **Compuestos orgánicos de mercurio**

Los compuestos orgánicos de Hg ingresan fácilmente al organismo por vía respiratoria, gastrointestinal y dérmica. Aquellos que se encuentran en los alimentos y el agua son absorbidos casi en su totalidad por el tracto digestivo. Una vez absorbidos, se unen a otras sustancias orgánicas por medio de los grupos sulfhidrilo. Casi el 90 % en la sangre se concentra en los eritrocitos, por lo tanto, se acumula en cerebro y demás órganos, manteniendo una concentración elevada en sangre. Cuando se ingiere el  $\text{HgCH}_3^+$ , éste es

absorbido rápidamente en un 95 % por el tracto intestinal. El  $\text{HgCH}_3^+$ , se acumula en mayor proporción en el hígado y el cerebro (Galvão y Corey, 1987).

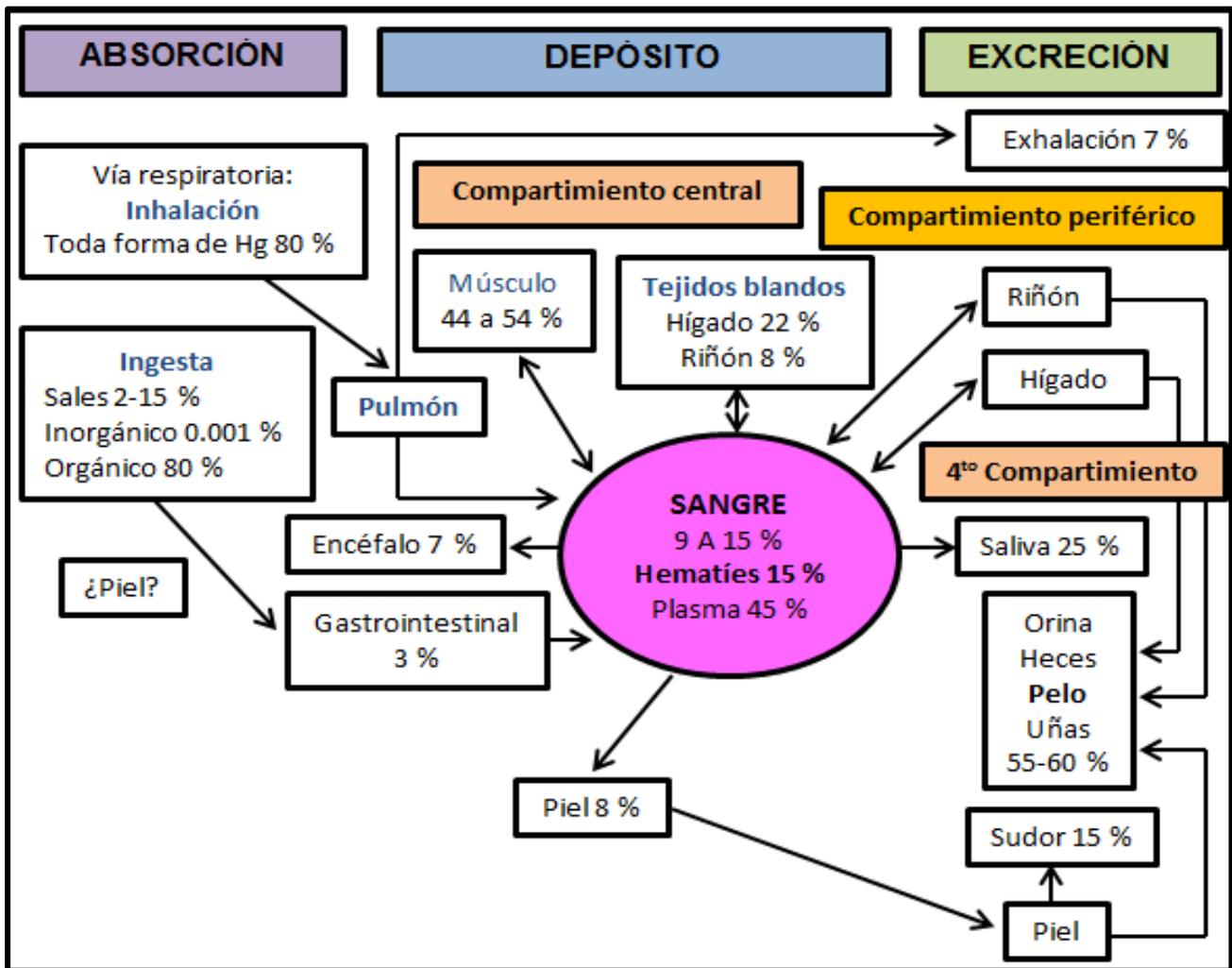
Por su liposolubilidad, los compuestos orgánicos atraviesan con facilidad las membranas biológicas, por lo que pasan fácilmente la barrera hematoencefálica y la placenta. Una parte del Hg orgánico absorbido sufre un proceso de desmetilación que da origen a una alta concentración de Hg inorgánico en riñón e hígado. La eliminación se efectúa principalmente por heces y de forma secundaria por la orina, cabello y leche materna. La vida media se ha calculado de 100 a 190 días (ANM, 2003).

Los efectos tóxicos del Hg, inorgánico y orgánico (Figura 3.12), se deben a que se unen a los constituyentes orgánicos celulares ricos en grupos sulfhidrilos, afectando a diversos sistemas metabólicos y enzimáticos de la célula y de su pared. La acción tóxica del Hg sobre los sistemas enzimáticos ocurre porque precipita las proteínas sintetizadas por la célula, principalmente las neuronas, y porque inhibe los grupos de varias enzimas esenciales.

En estado iónico, se fija a los grupos celulares ricos en radicales sulfhidrilo, altera varios sistemas metabólicos y enzimáticos de la célula y su pared, e inhibe la síntesis de proteínas en la mitocondria, afectando su función energética. En el riñón disminuye la actividad de las fosfatasas alcalinas de los túbulos proximales y altera el transporte de potasio y la ATPasa en la membrana. En el sistema enzimático inhibe enzimas esenciales. Por todo esto, el Hg puede causar lesión celular en cualquier tejido donde se acumule en concentración suficiente. En varios órganos induce la formación de metalotioneína, un receptor proteico de masa molar baja uniéndose a ella saturando sus propios receptores. Cuando por la gran cantidad de tóxico presente la metalotioneína se forma en exceso, causa alteraciones orgánicas en el mismo sitio de su producción (V. Ramírez, 2008).

El  $\text{HgCH}_3^+$  provoca una disminución de los anticuerpos humorales. Se ha observado que puede producirse un estímulo de la respuesta inmunitaria inicialmente tras cortas exposiciones. También puede fijarse sobre los ácidos desoxirribonucleicos con desnaturalización o asociaciones reversibles a la adenina y timina, lo cual podría explicar las aberraciones cromosómicas y anomalías congénitas observadas durante las intoxicaciones alimentarias con éste (Español, 2001).

Figura 3.12 Modelo toxicocinético del mercurio



Fuente: V. Ramírez, 2008.

Realizado por: Isela Martínez Fuentes.

### 3.3.5. Biomarcadores de exposición al Hg

La exposición humana a contaminantes químicos puede ser estimada por la cuantificación de los niveles de contaminantes en varios tejidos del cuerpo. Estos medios de medida se conocen como marcadores biológicos o biomarcadores y se consideran herramientas útiles para la vigilancia en salud y la evaluación de la exposición humana a tales contaminantes.

Los biomarcadores son indicadores del estado biológico, índices sensibles de una exposición individual al Hg u otras sustancias, determinando las consecuencias de dicha exposición; proporcionan una medida de la dosis interna, identifican a los individuos sensibles de una población y se pueden usar para evaluar los efectos adversos en la salud

y para mejorar el diagnóstico clínico, fundamentando la decisión de intervenir, tanto a nivel individual como ambiental (WHO, 2000; De la Rosa, et al., 2004).

En la evaluación de la idoneidad de un biomarcador de la exposición es importante tener en cuenta varios factores: ¿cómo el biomarcador se correlaciona con la exposición a varias formas del Hg y con la concentración de éste en el tejido blanco con las variaciones de exposición a lo largo del tiempo?; ¿qué tipo de biomarcador sería el más adecuado, considerando las características culturales de la población y qué tipo de tecnología está disponible para la cuantificación del biomarcador?, entre otros.

Existen diversas clasificaciones según el tipo de biomarcador:

- ✦ **Marcadores internos de dosis:** Son aquellos que indican que el tóxico ha entrado al organismo. Proporcionan información cuantitativa sobre la exposición y corroboran el ingreso de tóxicos al organismo. Son los resultados de la dosimetría interna, o sea la concentración de los xenobióticos y sus metabolitos en los medios biológicos.
- ✦ **Marcadores de dosis biológicamente efectivas:** Indican que el tóxico ya ha producido daños en el organismo. Son los compuestos de adición estables que forman el tóxico o sus productos de bioactivación con los ácidos nucleicos y proteínas. Cuando se encuentran compuestos de adición del ADN se puede concluir que el tóxico ha llegado a su blanco o que ha reaccionado con él y que probablemente ha producido una lesión la cual puede ser reparada o conducir a un daño permanente. Los productos de la bioactivación normalmente tienen una vida media muy corta y es difícil medir directamente su concentración, en este caso se determinan los marcadores de dosis biológicamente efectivas que producen. Los compuestos de adición de hemoglobina y albúmina son biomarcadores de dosis biológicamente efectivas muy convenientes debido a que se pueden obtener fácilmente de la sangre.
- ✦ **Marcadores de respuesta biológica:** Representan estados avanzados del proceso de daño, son más persistentes y a menudo representan alteraciones genéticas. Ejemplos de éstos son las mutaciones de ciertos oncógenes y los intercambios entre cromatinas hermanas.
- ✦ **Marcadores de susceptibilidad:** Se utilizan para identificar a los individuos más susceptibles a daños en una población. Algunos individuos tienen probabilidades más altas que otros de recorrer completo el camino exposición - enfermedad. Esto se puede

deber a que tienen más activos los procesos de bioactivación o a que tienen disminuidas sus capacidades de detoxificar, de excretar o de reparar daños.

Los marcadores de respuesta biológica y de enfermedad no pueden identificar el tóxico que produjo el daño, pero sí indican que el daño ha ocurrido y es necesario iniciar la intervención (De la Rosa, 2004). La sangre (incluida la sangre del cordón umbilical), cabello, orina, leche humana, uñas, saliva, entre otros son medios biológicos que pueden usarse como biomarcadores para la exposición al Hg en seres humanos.

Existen diversos métodos analíticos disponibles para determinar la concentración de Hg, aunque la elección del método depende de varios factores, como las normativas de análisis de cada país, las capacidades del laboratorio, los equipamientos disponibles y el recurso humano capacitado, etc. Sea cual sea el método de análisis utilizado, es extremadamente importante el control de calidad y la garantía de calidad de los datos obtenidos, incluyendo la determinación simultánea de las muestras certificadas (WHO & UNEP, 2008).

- **Cabello**

El cabello secuestra durante su formación  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  y muestra una relación directa con los niveles de Hg en la sangre, por lo cual proporciona un método preciso y confiable para medir los niveles de  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  en el organismo. La sangre se puede utilizar para estimar la exposición a corto plazo a  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  a diferencia del cabello. El cabello es la opción preferida para muchos estudios para estimar la exposición a mediano y largo plazo al Hg, pues proporciona una muestra simple que no es invasiva. Una vez incorporado en el cabello, el Hg no vuelve a la sangre, por lo tanto se caracteriza como un buen marcador a largo plazo de exposición (Di Bernardo, et al., 2010).

La estructura del cabello depende de la etnia y edad, y eso puede afectar la incorporación del Hg. El color del cabello, tratamientos químicos y físicos pueden remover el Hg del cabello. Si el cabello es utilizado para estimar la dosis de Hg, deben considerarse todos esos factores. El Hg total en el cabello es de aproximadamente 250 a 300 veces mayor que la concentración de Hg en la sangre en el momento en que el cabello se forma. El nivel normal de Hg en el cabello es de 1 - 2 ppm ( $\mu\text{g/g}$ ), sin embargo, las personas que consumen pescado una o más veces por día pueden tener niveles de Hg en cabello por encima de 10 ppm. La dosis de referencia de la USEPA es de 1 ppm de Hg

en cabello de personas que tienen bajo consumo de pescado. El  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  por lo general constituye cerca del 80 % de Hg total en cabello analizado entre los consumidores de pescado. Por tanto, el Hg en el cabello es un buen biomarcador de exposición al  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ , razón por la que se utiliza para caracterizar la exposición a éste (OPS-OMS, 2011).

El cabello no es tan buen indicador de exposición al vapor de Hg como la orina (WHO, 2000), sin embargo cuando se conoce la fuente de exposición se convierte en un buen biomarcador. Las mediciones de los niveles de Hg en el cabello de manera secuencial pueden ayudar a la identificación de picos de exposición. En algunos estudios se han identificado picos de exposición de tipo crónica como un factor importante que contribuye a efectos adversos a la salud (OPS-OMS, 2011). El cabello crece aproximadamente de 1 a 2 cm por mes, lo que permite la evaluación del perfil de la exposición a través del tiempo (WHO, 2000).

- **Sangre**

La presencia de Hg en la sangre indica la exposición reciente o actual. Existe una relación directa entre las concentraciones de Hg en la sangre humana y el consumo de pescado contaminado con  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ . Como se describió anteriormente, el  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  en la dieta se absorbe fácilmente por el tracto gastrointestinal y se distribuye a todo el cuerpo por la sangre. Por lo general, la concentración de  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  en la sangre alcanza un máximo en 4 a 14 horas y pasa a través de depuración de la sangre a otros tejidos del cuerpo después de 20 a 30 horas.

La Organización Mundial de la Salud considera que la concentración normal de Hg total en sangre es entre 5 y 10  $\mu\text{g/L}$  en personas con un consumo de pescado contaminado. El Consejo de Investigación Nacional (por sus siglas en inglés, NRC) identifica 2  $\mu\text{g/L}$  como la concentración media normal para la población con poco o ningún consumo de pescado en los EE. UU. (OMS, 2013).

La recolección, almacenamiento y transporte de muestras de sangre depende de varios factores, ya que la extracción de sangre es un procedimiento invasivo en el individuo, la cual generalmente se extrae de una vena y requiere material estéril adecuado y profesionales capacitados para garantizar que las muestras se recolecten de forma segura y correcta, además de que se requiere el consentimiento de la persona (WHO, 2000).

- **Orina**

La presencia de Hg en orina generalmente indica la exposición a su forma inorgánica o elemental. Los niveles de Hg en orina se consideran la mejor medida de exposición reciente a vapor de Hg inorgánico y elemental, pues es utilizado para indicar los niveles de Hg presentes en los riñones (WHO & UNEP, 2008).

Sin embargo, como se ha explicado anteriormente, el Hg inorgánico acumulado en el riñón se excreta lentamente por la orina. Por tanto, estos niveles también pueden representar la exposición a estas formas de Hg que ocurrió en algún momento en el pasado. La concentración de residuos en orina puede variar significativamente debido a la cantidad de dilución con agua; las pruebas por contaminación con Hg en la orina son frecuentemente expresados en unidades de contaminante (Hg en  $\mu\text{g}$ ) por gramo de creatinina (producto de descomposición de la creatina, que es una parte importante del músculo). Los niveles de Hg en la orina rara vez superan los 5  $\mu\text{g/g}$  de creatinina en personas que no están expuestas al Hg (WHO & UNEP, 2008).

- ❖ **Conversión de los niveles de biomonitoreo de exposición**

Los niveles de Hg se miden en un medio específico, como la sangre, cabello u orina, y se pueden convertir en un estimado de la dosis diaria, media o a largo plazo por medio de diversos factores de conversión. Sin embargo, debe considerarse que existen limitaciones, incertidumbres y variabilidad en el uso de estos factores de conversión. Por ejemplo: la exposición a las diferentes formas de Hg y compuestos inorgánicos en las amalgamas dentales y la exposición al  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  a través del consumo de pescado darán lugar a resultados diferentes con respecto a los niveles del tejido y depuración; por lo tanto, debe considerarse la exposición a diferentes formas de Hg.

Por otra parte, hay un intervalo entre la exposición a las diversas formas del Hg y la cantidad que se encuentra en varios tejidos del cuerpo. Sin embargo, la relación cuantitativa entre los niveles de Hg en el cabello y la sangre y los niveles medios de la dosis diaria de Hg, en especial de  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ , se entienden razonablemente bien. Por lo tanto, la dosis de este tipo de conversiones a menudo se puede hacer con una confianza razonable si se conoce la información sobre las formas de Hg.

También pueden identificarse las variaciones en poblaciones específicas. Por ejemplo, en una ingesta de  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  con un promedio diario de 0.1 microgramos por kg de peso corporal por día ( $0.1 \mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{día}$ ) por una mujer adulta, se estiman concentraciones de Hg de alrededor de  $1 \mu\text{g}/\text{g}$  en cabello, los niveles de la sangre de cordón umbilical de aproximadamente 5 a  $6 \mu\text{g}/\text{L}$  y las concentraciones de Hg en la sangre alrededor de 4 a  $5 \mu\text{g}/\text{L}$ . Esta relación suele ser directamente proporcional. Si la información disponible indica que el  $\text{CH}_3\text{Hg}^+$  es la forma principal de exposición al Hg, y se dispone de datos sobre los niveles medidos en la sangre o cabello, entonces se puede calcular la dosis diaria estimada (CCCB-CRCE, 2014; Murray, 1995; SQDS, 2006; WHO, 2008).

### ***3.3.6. Métodos de análisis de Hg***

La identificación y cuantificación de Hg en materiales biológicos y ambientales para atender la Vigilancia Ambiental en Salud (VAS) y las investigaciones científicas exigen un cuidado especial, por varias razones:

1. Debido a que el Hg es un elemento circulante en la naturaleza, todos los procedimientos analíticos para cuantificar este metal exigen ambientes con el máximo de limpieza para aumentar la confiabilidad y garantizar la calidad de los resultados;
2. El Hg elemental es líquido y volátil a temperatura ambiente, lo que dificulta los procesos de apertura de muestras altamente energéticas, es decir, se deben tomar precauciones para evitar pérdidas por volatilización;
3. Los estudios de los ciclos biogeoquímicos del Hg demuestran que en la naturaleza este metal se presenta tanto en la forma elemental como en las formas inorgánica y orgánica, siendo estas últimas de mayor toxicidad, por lo que es necesario realizar análisis toxicológicos más complejos que exigen procedimientos de especiación química, métodos que, a pesar de los avances tecnológicos, incluso hoy son lentos y caros;
4. Algunos tipos de muestras biológicas y ambientales presentan Hg en niveles traza que exigen usar equipos con detectores altamente sensibles, procesos delicados de preconcentración y reactivos apropiados con alto grado de pureza (OPS-OMS, 2011).

### **a) Métodos tradicionales de análisis de mercurio total**

A partir de las características físicas y químicas del Hg, los métodos de apertura ácida y análisis por Espectrometría de Absorción Atómica con Vapor Frío (EAA-VF), Espectrometría de Absorción Atómica con Generación de Hidruros (EAA-GH), Espectrometría de Absorción Atómica con Horno de Grafito (EAA-HG), Espectrometría de Fluorescencia Atómica (EFA) y Espectrometría de Masas Acoplado con Plasma Inducido (ICP-MS), son los más extensamente utilizados para cuantificar el Hg en materiales biológicos y ambientales. Todas son tecnologías con buena sensibilidad y permiten cuantificar el Hg en niveles traza y ultratrazas. Sin embargo, la elección de estos métodos y tecnologías involucra aspectos como: el costo inicial de las herramientas espectroanalíticas, la cantidad de reactivos utilizados en las etapas de apertura, los niveles de interferencias espectrales, entre otros.

Actualmente los costos para adquirir equipos que usan ICP-MS son elevados, así como los costos de mantenimiento. En un segundo intervalo de costos iniciales están los equipos de EAA-GH, EAA-HG y EFA y, por último, los equipos de EAA-VF. Los equipos de EAA-VF, además de ser menos costosos, están disponibles en el mercado en configuraciones exclusivas para analizar Hg total a partir del uso de lámparas específicas y mejoramientos espectrales.

Esta configuración de los equipos de EAA-VF, además de su versatilidad, disminución de costos y aplicabilidad en matrices biológicas y ambientales, permite aumentar la sensibilidad en las metodologías que usan este tipo de tecnología, ya que generalmente sus límites de detección son tan buenos como los obtenidos para metodologías que usan equipos de ICP-MS, EAA-GH, EAA-HG y EFA. No obstante, a pesar de que las otras tecnologías espectroanalíticas son más costosas, como la ICP-MS, presentan menores posibilidades de interferencias espectrales, encubrimiento de los resultados, y se ejecutan con menor cantidad de reactivos.

### **b) Métodos de análisis directo de mercurio total**

Los métodos para análisis directo de Hg total se basan en las etapas de combustión de las muestras y el análisis por Espectrometría de Absorción Atómica (EAA). Presentan como gran diferencial el uso de métodos que simplifican el tratamiento de las muestras,

resumiéndose normalmente las etapas de secado y de homogeneización de acuerdo con el tipo de matriz biológica o ambiental que se desea evaluar. Son métodos en los que el uso de reactivos disminuye significativamente, al igual que el costo de los análisis. Sin embargo, de acuerdo con los niveles que se van a cuantificar, pueden presentar limitaciones de sensibilidad y robustez relacionadas con oscilaciones significativas en el ruido de fondo, factor característico de los equipos de combustión/pirólisis.

### c) Determinación de Hg por la técnica: Espectrofotometría de Absorción Atómica

#### \*Fundamentos teóricos

La Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA) mide la cantidad de luz que es absorbida por los átomos en estado fundamental de un analito a la longitud de onda resonante, pasando al estado excitado. La luz incidente (de las longitudes de onda específicas a las cuales absorben los átomos del analito) es emitida por una lámpara de cátodo hueco o de descarga sin electrodo. La luz que se absorbe sigue la ley de Lambert - Beer (Figura 3.13) de acuerdo con las siguientes ecuaciones simplificadas:

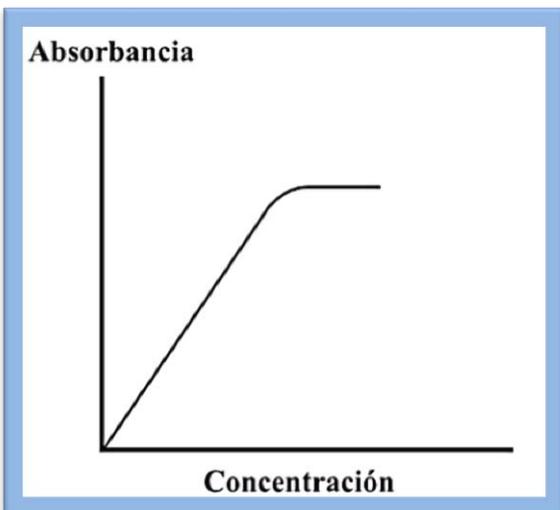
$$T = I/I_0 \quad (3.1)$$

$$\%A = 100 - \%T \quad (3.2)$$

$$A = \log(I_0/I) \quad (3.3)$$

$$A = \epsilon c l \quad (3.4)$$

**Figura 3.13 Gráfico de la variación de la absorbancia en función de la concentración de analito.**



donde:

T = transmitancia;

$I_0$  = intensidad de luz incidente;

A = absorbancia;

l = longitud de paso óptico (cm);

c = concentración del analito ( $\text{mol L}^{-1}$ );

I = intensidad de la luz después de atravesar la solución conteniendo el analito;

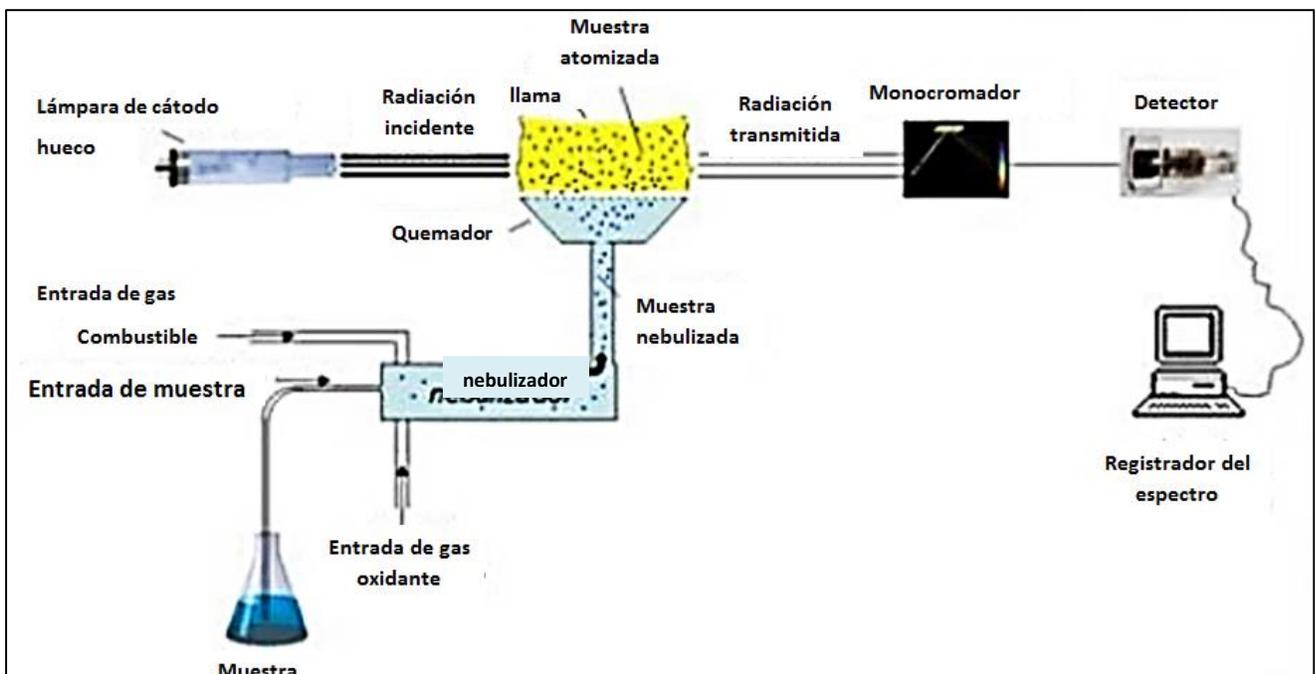
$\epsilon$  = coeficiente de absorción molar ( $\text{L mol}^{-1} \text{cm}^{-1}$ )

### \*Generación de Hidruros

La técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica con Generación de Hidruros permite cuantificar en el orden de ppb o ultratrazas elementos como As, Se, **Hg**, Sn, Sb, Ge, Bi y Te, que tienen la propiedad de formar el hidruro correspondiente. La muestra disuelta en ácido diluido se mezcla con un agente reductor, tal como una solución de cinc y ácido clorhídrico, cloruro de estaño ( $\text{SnCl}_2$ ) o borohidruro de sodio ( $\text{NaBH}_4$ ), siendo el  $\text{NaBH}_4$  el reductor más utilizado. Esta reacción produce hidrógeno atómico que reacciona con el elemento a analizar en la disolución para formar hidruros volátiles.

Los hidruros volátiles son arrastrados por un gas portador como nitrógeno a una celda de cuarzo, que es calentada por una llama de aire-acetileno a una temperatura optimizada para producir la atomización del analito. Cuando los gases pasan a través de este tubo calentado, ocurre una descomposición térmica, y se liberan los átomos del elemento. Al pasar la luz emitida por la lámpara a través del conjunto de átomos, la absorción crece a medida que éstos se producen, llega a un máximo y cae al consumirse el analito y agotarse los átomos de la celda de absorción (Figura 3.14). Se puede registrar el máximo de absorción, que corresponde a la altura de pico, o el área bajo la curva para relacionarlas con la concentración del analito (García, 2010).

**Figura 3.14 Diagrama esquemático del Generador de Hidruros**



### **\*Espectrofotometría de Absorción Atómica con vapor frío**

Tradicionalmente se ha empleado como técnica para la detección de Hg, la Espectrofotometría de Absorción Atómica con vapor frío, debido a que este analito es un metal volátil y existe como elemento neutro en fase de vapor a temperatura ambiente. El Hg es el único elemento capaz de generar considerable número de átomos en fase vapor sobre la superficie del metal líquido sin necesidad de suministrar energía térmica por una llama u otro sistema de atomización, lo cual dio origen al término “vapor frío” (López, 2013).

El Hg iónico puede determinarse de esta forma, mientras que el Hg enlazado orgánicamente debe ser previamente digerido en medio ácido.

La técnica de vapor frío sólo detecta Hg en forma iónica, la sensibilidad y reproducibilidad son mejoradas si las muestras y estándares son acidificadas con HCl concentrado. El método consiste, primero, en reducir los iones de  $\text{Hg}^{2+}$  a  $\text{Hg}^0$  con el  $\text{NaBH}_4$  en medio de ácido (ecuación 3.5). El  $\text{Hg}^0$  al estado de vapor es transportado después por el gas portador hasta la celda cerrada de cuarzo, donde se atomiza a temperatura ambiente.

## **CAPÍTULO IV**

### **4. MÉTODO EXPERIMENTAL**

El presente estudio se realizó con dos poblaciones de la República Mexicana; una potencialmente expuesta (mineros) de la región minera de San Joaquín, Querétaro y la otra al sur de la ZMCM (Ciudad Universitaria) no expuesta ocupacionalmente; dividiéndolo en dos secciones.

La primera etapa correspondió al diagnóstico, organización y planificación de las labores realizadas por los participantes mediante una encuesta tiempo-actividad (Anexo 1 y Anexo 2) en relación a sus datos personales (edad, ocupación, ubicación geográfica), hábitos alimenticios y de higiene personal, tratamientos cosméticos en el cabello y salud bucal.

La segunda consistió en la toma de muestras; se tomaron muestras de cabello de 24 mineros, que actualmente laboran en las minas de mercurio la Poza, Rosario, Otatal, Atenea, la Fortaleza, la Maravilla y la Barranca, ubicadas en la región de San Joaquín. Por otra parte se obtuvieron muestras de 36 estudiantes voluntarios de la Facultad de Química (Ciudad Universitaria), 18 hombres y 18 mujeres de entre 21 y 25 años de edad, habitantes de la ZMCM.

#### **4.1. Matriz biológica**

El Hg presenta gran afinidad química por los grupos sulfhidrilos de la queratina y otras proteínas que forman parte del cabello. Además es una de las matrices preferidas en la medición de Hg, ya que es un procedimiento no invasivo, que provee una muestra simple, integradora del perfil de exposición a lo largo del tiempo, el cual puede permanecer con cambios en la concentración muy poco notorios por años. Asimismo, como se señaló, una de las ventajas del análisis de cabello es que una vez que el Hg se ha incorporado a éste no regresa a la sangre.

## 4.2. Toma y almacenamiento de la muestra

La región más recomendada del cuero cabelludo para tomar la muestra de cabello es la nuca, esto se debe a que es el lugar menos susceptible de contaminación externa; por lo que se cortaron de 2 a 3 mechones entre 1 y 2 cm de longitud justo en la parte que queda en la base en contacto con la nuca, antes de proceder a la toma de muestra fue necesario limpiar la tijera con acetona o alcohol para eliminar todo vestigio de grasa y polvo que pudiera quedar en sus superficies de corte, de igual manera el analista utilizó guantes.

**Figura 4.1 Zona de toma de muestra de cabello**



Fuente: Cespón, 2008.

Una vez realizado lo anterior, las muestras se colocaron en tubos de polietileno, lavados previamente con una disolución de ácido nítrico 3 M durante 24 horas y enjuagados con agua desionizada ASTM (agua tipo II, preparada por destilación, libre de impurezas orgánicas, con una conductividad eléctrica ( $\mu$ ) de 18.2 M $\Omega$ ·cm a 25 °C) recomendada para la mayoría de las pruebas analíticas y generales de laboratorio, tales como los análisis hematológicos, serológicos y microbiológicos; así como para métodos químicos en los que específicamente no se indique o se haya comprobado que requiere agua de calidad tipo I. Posteriormente fueron esterilizados para evitar contaminación microbiana y con ello posible variación en el pH de las muestras.

### **4.3. Preparación de las muestras de cabello**

#### ***a) Lavado de las muestras***

Al determinar la concentración de elementos procedentes de la absorción endógena, el proceso de lavado se convierte en la parte más importante del análisis, ya que un procedimiento ideal de lavado debe eliminar sólo los contaminantes externos, dejando intactos los elementos endógenos.

La Agencia Internacional de Energía Atómica (por sus siglas en inglés, IAEA) ha examinado diferentes procedimientos de lavado y ha establecido que las variables asociadas a este proceso, es decir, la eliminación incompleta de contaminantes exógenos y eliminación parcial de contaminantes endógenos son difíciles de controlar; así, el método de la IAEA es el más utilizado, y se basa en el lavado secuencial del cabello con una mezcla de acetona, agua cubriendo completamente el cabello con la disolución con agitación constante, por ello, las muestras de cabello a analizar fueron lavadas con 5 mL de una mezcla acetona, agua 1:1 para eliminar partículas de polvo, sudor, grasa y otros contaminantes externos, con agitación constante durante 5 minutos (López, 2013).

Después del lavado se prosiguió a decantar el líquido y dejar secar las muestras de cabello a temperatura ambiente.

#### ***b) Digestión de las muestras***

Posteriormente se realizó una digestión ácida de las muestras en horno de microondas, para la cual se pesó cada una de las muestras de cabello seco, se colocaron en tubos liner (Figura 4.3), se agregaron 10 mL de ácido nítrico 3.2 M y 5 mL de peróxido de hidrógeno. Para cada ciclo de digestión se montó un blanco de reactivos, el cual se preparó agregando directamente en el recipiente de teflón los reactivos sin cabello o material de referencia.

La digestión se realizó por el método Cesar HP500 preestablecido en el equipo, en un sistema de reacción de microondas (horno) marca CEM, modelo MARS5 (Figura 4.2) en recipientes cerrados de teflón. El residuo obtenido de dicho proceso digestivo fue vertido en un matraz aforado de 50 mL, el cual se llevó al aforo con agua desionizada.

**Figura 4.2 Horno de microondas MARS5**



**Figura 4.3 Recipientes de teflón cerrados utilizados para digestión**



#### 4.4. Análisis químico

La determinación de Hg en las muestras de cabello se realizó mediante la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica con Generación de Hidruros con Vapor Frío, empleando un Espectrofotómetro de Absorción Atómica (GBC 932AA) acoplado a un Generador de Hidruros (GBC HG3000), ambos controlados por una computadora (Figura 4.4). La calibración se realizó empleando estándares certificados que se prepararon dentro del intervalo de concentración esperado de las muestras trazables al Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (por sus siglas en inglés, NIST), utilizando curvas de calibración con concentraciones en ppb ( $\mu\text{g/L}$ ) de 1, 2, 5, 8, 10, 15 y su respectivo blanco reactivo.

El Hg se midió a una longitud de onda de 253.7 nm.

**Figura 4.4 Espectrofotómetro GBC 932AA acoplado a Generador de Hidruros GBC HG3000.**



Espectrofotómetro, propiedad del Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

## **CAPÍTULO V**

### **5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En este capítulo se abordan los resultados obtenidos del análisis químico de Hg en las muestras de cabello, así como los parámetros del aseguramiento de calidad del método, realizando un breve discusión con el fin de explicar dichos resultados.

#### **5.1. Aseguramiento de calidad**

De acuerdo con la Norma Mexicana (NMX-EC-17025-IMNC- 2006, Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración), la validación de los métodos analíticos es un requisito indispensable antes de realizar una medición analítica, ya que el desempeño de un método analítico es diferente en cada laboratorio que lo realiza y además los métodos analíticos no se pueden utilizar para medir algún mensurando en cualquier matriz, sino que son muchas veces específicos para la matriz en la que fueron desarrollados y por ende validados originalmente. Considerando que el análisis químico en este estudio se realizó mediante pruebas espectrofotométricas por Absorción Atómica, los parámetros finales de desempeño con base en ésta son: límite de detección y límite de cuantificación.

##### **➤ Límite de detección y límite de cuantificación**

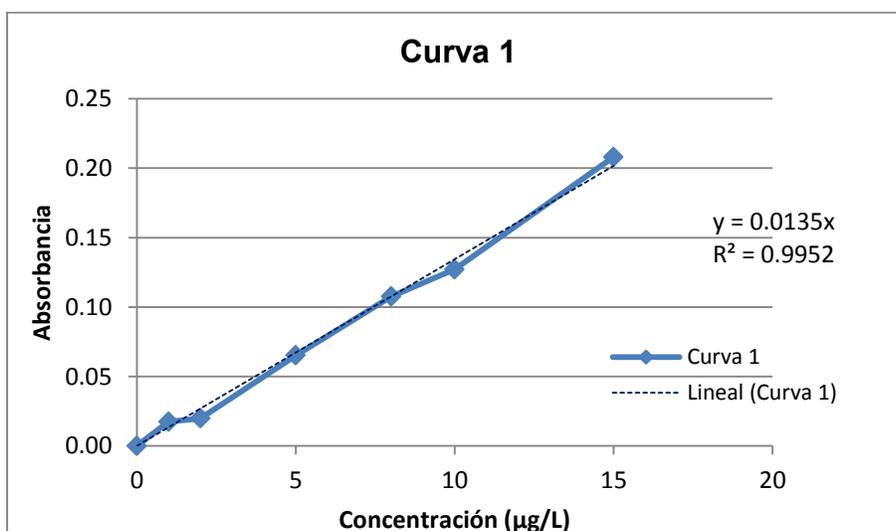
El cálculo del límite de detección (LD) y el límite de cuantificación (LC) se realiza a partir de la lectura de absorbancia de un blanco reactivo, utilizando mínimo cinco niveles diferentes de concentración para la realización de las curvas de calibración, tomando en cuenta que cada nivel debe realizarse por triplicado; por lo que en este estudio se realizaron nueve curvas de calibración (Tabla 5.1 – Tabla 5.9)

**Tabla 5.1 Curva de calibración de Hg N° 1**

Estándar	Conc. (µg/L)	Abs.	%RSD
Blanco	0	0.0000	0.00
Estándar 1	1	0.0174	6.97
Estándar 2	2	0.0199	0.00
Estándar 3	5	0.0652	2.00
Estándar 4	8	0.1076	5.73
Estándar 5	10	0.1272	3.54
Estándar 6	15	0.2080	0.42

Abs. (absorbancia); %RSD (desviación estándar relativa)

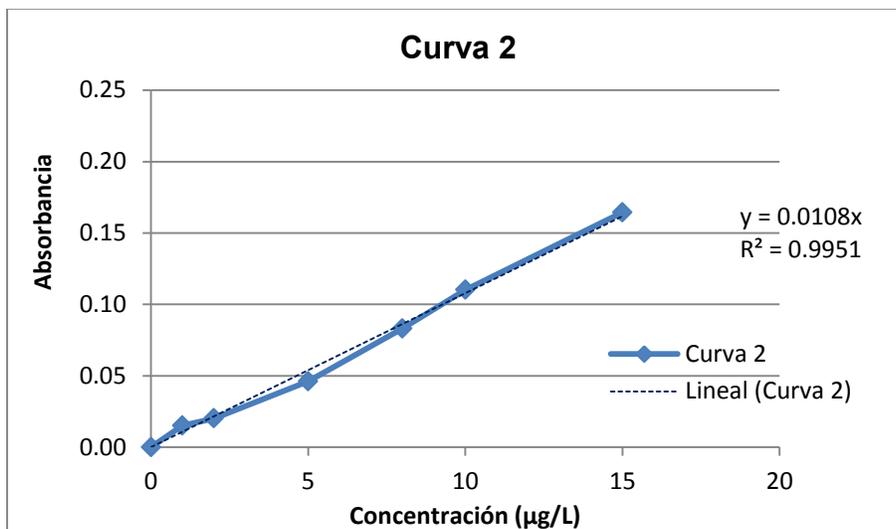
**Gráfico 5.1 Curva de calibración de Hg N° 1**



**Tabla 5.2 Curva de calibración de Hg N° 2**

Estándar	Conc. (µg/L)	Abs.	%RSD
Blanco	0	0.0000	0.00
Estándar 1	1	0.0151	13.05
Estándar 2	2	0.0201	14.03
Estándar 3	5	0.0461	4.64
Estándar 4	8	0.0831	5.62
Estándar 5	10	0.1102	7.76
Estándar 6	15	0.1644	13.05

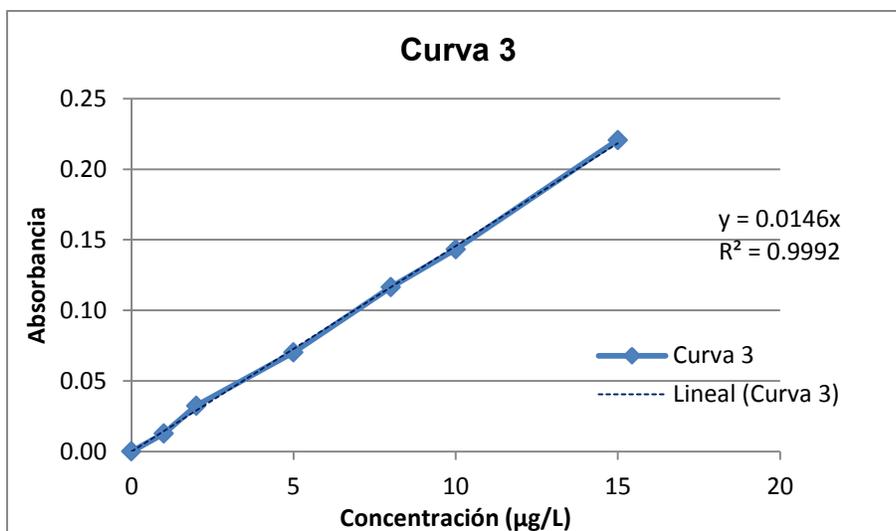
**Gráfico 5.2 Curva de calibración de Hg N° 2**



**Tabla 5.3 Curva de calibración de Hg N° 3**

Estándar	Conc. (µg/L)	Abs.	%RSD
Blanco	0	0.0000	0.00
Estándar 1	1	0.0128	19.13
Estándar 2	2	0.0324	10.30
Estándar 3	5	0.0702	7.34
Estándar 4	8	0.1165	7.19
Estándar 5	10	0.1433	3.11
Estándar 6	15	0.2206	4.66

**Gráfico 5.3 Curva de calibración de Hg N° 3**

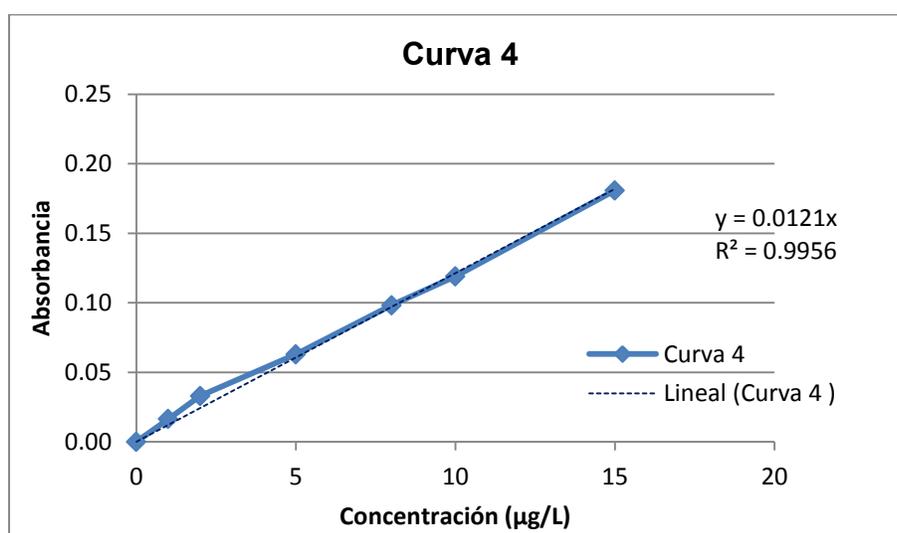


**Tabla 5.4 Curva de calibración de Hg N° 4**

Estándar	Conc. (µg/L)	Abs.	%RSD
Blanco	0	0.0000	0.00
Estándar 1	1	0.0164	High*
Estándar 2	2	0.033	15.00
Estándar 3	5	0.0629	7.72
Estándar 4	8	0.0982	4.66
Estándar 5	10	0.1190	5.80
Estándar 6	15	0.1808	3.23

\*High. % Desviación estándar relativa igual o mayor a 20.

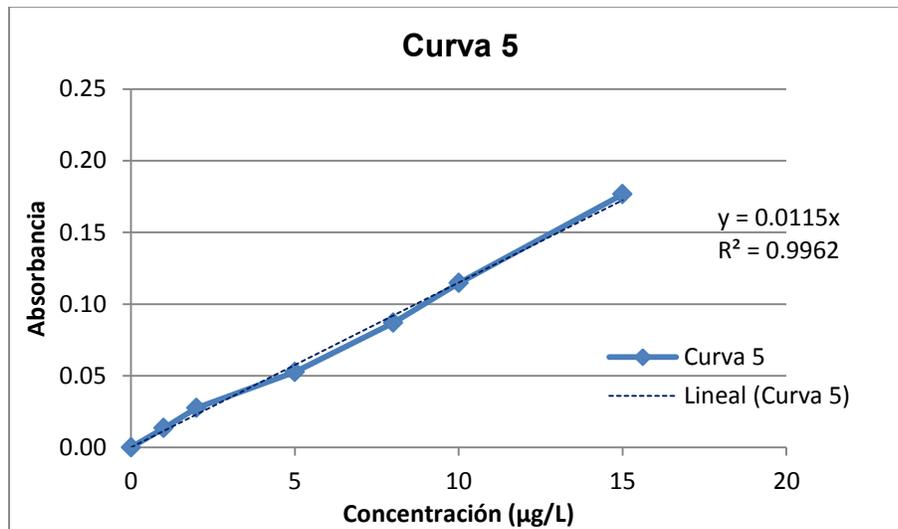
**Gráfico 5.4 Curva de calibración de Hg N° 4**



**Tabla 5.5 Curva de calibración de Hg N° 5**

Estándar	Conc. (µg/L)	Abs.	%RSD
Blanco	0	0.0000	0.00
Estándar 1	1	0.0134	8.07
Estándar 2	2	0.0275	8.96
Estándar 3	5	0.0526	4.63
Estándar 4	8	0.0869	3.90
Estándar 5	10	0.1146	8.83
Estándar 6	15	0.1766	3.50

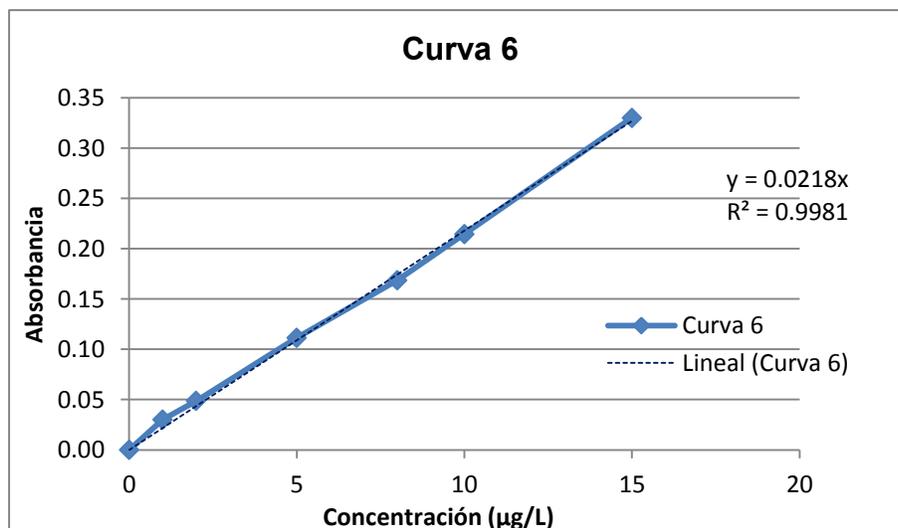
**Gráfico 5.5 Curva de calibración de Hg N° 5**



**Tabla 5.6 Curva de calibración de Hg N° 6**

Estándar	Conc. ( $\mu\text{g/L}$ )	Abs.	%RSD
Blanco	0	0.0000	0.00
Estándar 1	1	0.0302	16.87
Estándar 2	2	0.0487	8.89
Estándar 3	5	0.1114	4.73
Estándar 4	8	0.1687	1.20
Estándar 5	10	0.2144	2.49
Estándar 6	15	0.3299	1.64

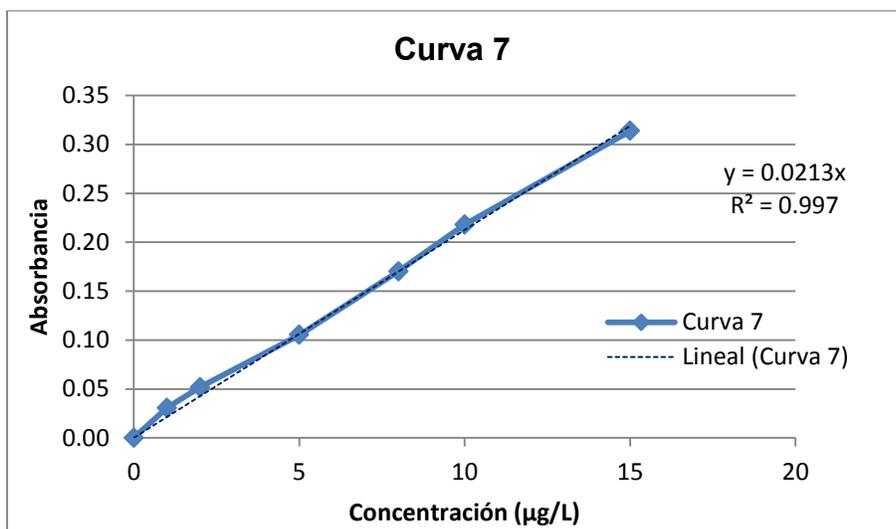
**Gráfico 5.6 Curva de calibración de Hg N° 6**



**Tabla 5.7 Curva de calibración de Hg N° 7**

Estándar	Conc. (µg/L)	Abs.	%RSD
Blanco	0	0.0000	0.00
Estándar 1	1	0.0306	3.82
Estándar 2	2	0.0517	7.06
Estándar 3	5	0.1052	3.43
Estándar 4	8	0.1702	0.41
Estándar 5	10	0.2179	1.10
Estándar 6	15	0.3137	3.32

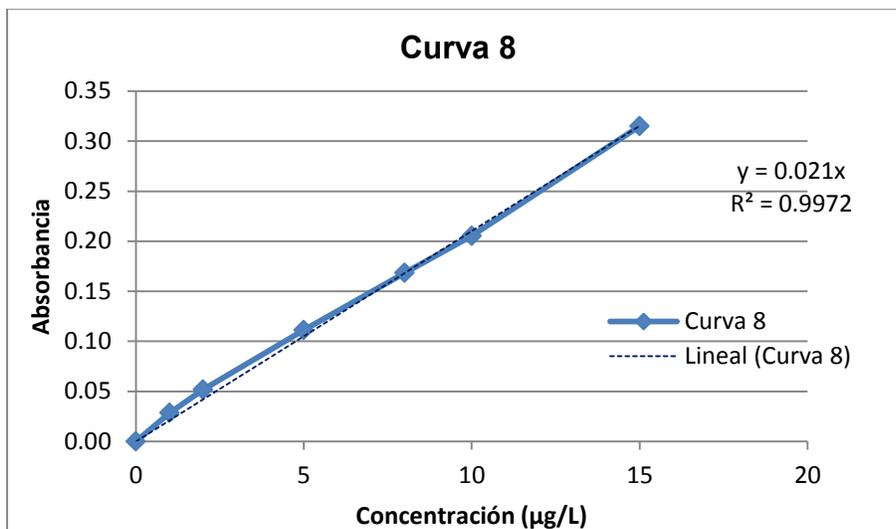
**Gráfico 5.7 Curva de calibración de Hg N° 7**



**Tabla 5.8 Curva de calibración de Hg N° 8**

Estándar	Conc. (µg/L)	Abs.	%RSD
Blanco	0	0.0000	0.00
Estándar 1	1	0.0284	12.45
Estándar 2	2	0.0518	7.55
Estándar 3	5	0.1112	5.12
Estándar 4	8	0.1682	2.94
Estándar 5	10	0.2053	2.31
Estándar 6	15	0.3150	1.83

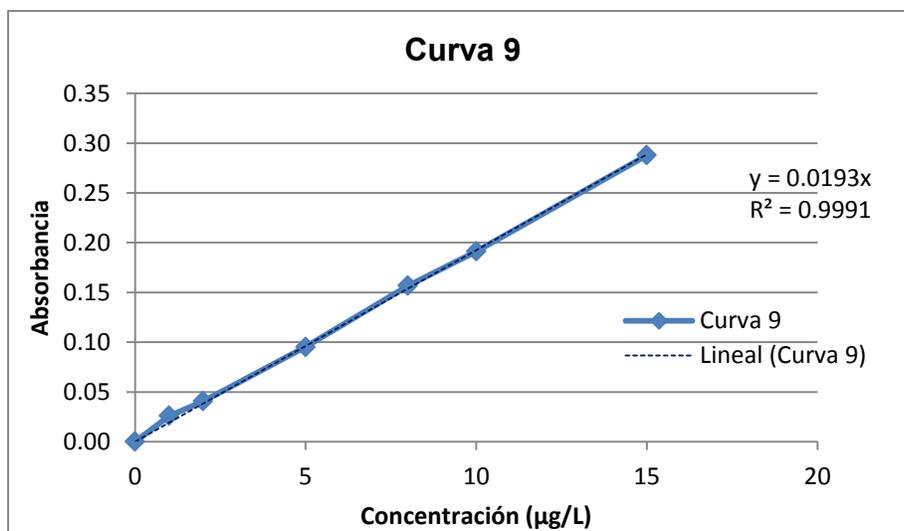
**Gráfico 5.8 Curva de calibración de Hg N° 8**



**Tabla 5.9 Curva de calibración de Hg N° 9**

Estándar	Conc. (µg/L)	Abs.	%RSD
Blanco	0	0.0000	0.00
Estándar 1	1	0.0259	11.05
Estándar 2	2	0.0407	3.19
Estándar 3	5	0.0952	6.81
Estándar 4	8	0.1567	3.99
Estándar 5	10	0.1913	5.03
Estándar 6	15	0.2879	3.01

**Gráfico 5.9 Curva de calibración de Hg N° 9**



En la tabla 5.10 se muestra la lectura de absorbancia de los blancos que se prepararon.

**Tabla 5.10 Lectura de absorbancia de los blancos**

Curva N°	Abs. blanco	%RSD
1	<b>0.0180*</b>	8.92
2	0.0343	5.25
3	0.0324	8.9
4	0.0337	High
5	0.0302	4.94
6	0.0332	15.73
7	0.0303	1.14
8	0.0307	6.35
9	0.0352	9.83

Promedio abs. = 0.0309; Desviación estándar abs. = 0.0052; \*Posible dato anómalo = 0.0180

Con cierta frecuencia en un conjunto de medidas uno o más de los resultados que se obtienen difiere del resto de forma inexplicable, estas medidas se denominan resultados anómalos. En la tabla 5.10 se observa que el dato de absorbancia de uno de los blancos puede ser un resultado anómalo, por lo que se aplicó el **contraste de Dixon** (a veces llamado **contraste Q**), el cual permite evaluar una medida sospechosa comparando la diferencia entre ella y la medida más próxima en tamaño, con el intervalo de las medidas. Para usar el contraste de Dixon para un valor anómalo, esto es, para probar la veracidad de una hipótesis nula ( $H_0$ ), que es aquella adoptada para referir que no hay otra diferencia entre el valor observado y el conocido que la atribuir a la variación aleatoria.

Utilizando el contraste de Dixon para el posible valor anómalo (**0.0180**), para probar  $H_0$ : todas las medidas proceden de la misma población, se calcula el estadístico Q:

$$Q = \frac{|\text{valor sospechoso} - \text{valor más cercano}|}{(\text{valor más grande} - \text{valor más pequeño})}$$

donde:

$$\begin{aligned} \text{valor sospechoso} &= \mathbf{0.0180}; & \text{valor más cercano} &= \mathbf{0.0302} \\ \text{valor más grande} &= \mathbf{0.0352}; & \text{valor más pequeño} &= \mathbf{0.0180} \end{aligned}$$

por lo tanto

$$Q = \frac{|0.0180 - 0.0302|}{(0.0352 - 0.0180)} = \mathbf{0.709}$$

El valor crítico de Q para  $P = 0.05$  dado para un contraste de dos colas es:  $Q = 0.493$  para una muestra de  $n = 9$ .

Debido a que el valor de Q calculado ( $Q = 0.709$ ) supera al valor crítico ( $Q = 0.493$ ), **se rechaza el valor sospechoso.**

Otro contraste utilizado frecuentemente para datos anómalos es el **contraste de Grubbs**, que compara la desviación entre el valor sospechoso y la media muestral, con la desviación estándar de la muestra. Para usar el contraste de Gubbs para el posible valor anómalo (**0.0180**), para probar  $H_0$ : todas las medidas proceden de la misma población, se calcula el estadístico G:

$$G = \frac{|\text{valor sospechoso} - \text{promedio}|}{\text{desviación estándar}}$$

donde:

$$\text{valor sospechoso} = 0.0180; \quad \text{promedio} = 0.0309; \quad \text{desviación estándar} = 0.0052$$

por lo tanto

$$G = \frac{|0.0180 - 0.0309|}{0.0052} = 2.499$$

El valor crítico de G para  $P = 0.05$  es  $G = 2.215$  para una muestra de  $n = 9$ .

Debido a que el valor de G calculado ( $G = 2.499$ ) supera al valor crítico ( $G = 2.215$ ), **se rechaza  $H_0$  y por tanto el valor sospechoso se considera como anómalo.**

Con el análisis realizado a los valores de absorbancia de los blancos se obtiene que el valor 0.0180 es un dato anómalo, descartándolo de la población de estudio, por lo que fue necesario el cálculo del promedio y desviación estándar para los datos restantes (Tabla 5.11).

**Tabla 5.11 Lectura de absorbancia de los blancos, descartando valores anómalos**

Curva N°	Abs. blanco	%RSD
2	0.0343	5.25
3	0.0324	8.9
4	0.0337	HIGH
5	0.0302	4.94
6	0.0332	15.73
7	0.0303	1.14
8	0.0307	6.35
9	0.0352	9.83

Promedio abs. = 0.0325; Desviación estándar abs. = 0.0019

Con los valores de absorbancia de los blancos, se realizó el cálculo del valor numérico del límite de detección y del límite de cuantificación.

**a) Límite de detección**

Se entiende como límite de detección a la concentración más baja a la cual puede detectarse el analito pero no necesariamente cuantificarse bajo las condiciones experimentales establecidas. Obteniendo su valor numérico a partir de la ecuación:

$$\text{Límite de detección (LD)} = Y_b + (n)s_b$$

donde:

$$Y_b = \text{promedio de la señal del blanco o ruido de fondo} = 0.0325$$

$$(n)s_b = \text{de 2 a 5 veces el promedio de la desviación estándar del blanco} = (n) 0.0019$$

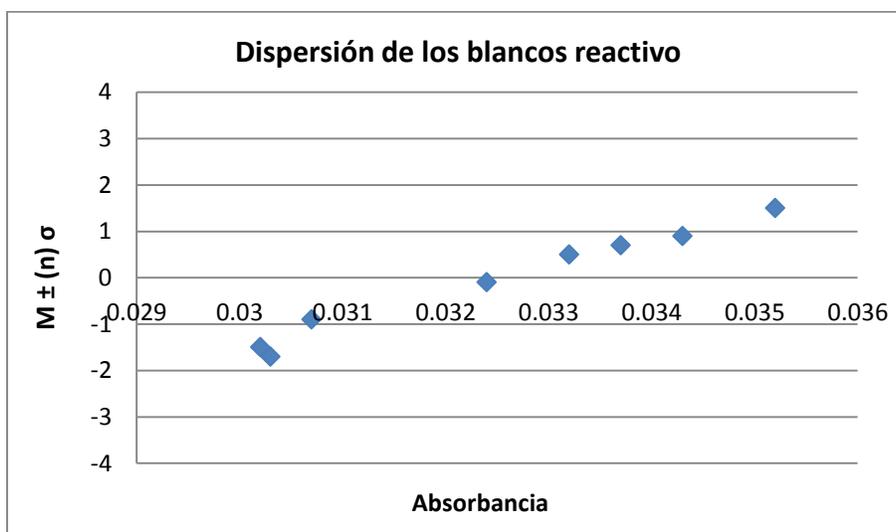
Debido a que en la literatura se reporta que el número de veces de la desviación estándar utilizado para el cálculo del LD se encuentra entre 2 y 5, se realizó el gráfico de dispersión con respecto a la media de los blancos reactivos y su desviación estándar (Tabla 5.12) con los datos obtenidos de absorbancia de éstos (Tabla 5.11), observando que en su mayoría se encuentran entre la media más, menos dos veces la desviación estándar (**M ± 2s**) (Gráfico 5.10).

**Tabla 5.12 Valores de absorbancia media más, menos (n) veces la desviación estándar**

<b>M ± (n)s</b>	<b>Abs.</b>
<b>M - 4s</b>	0.0248
<b>M - 3s</b>	0.0267
<b>M - 2s</b>	0.0287
<b>M - s</b>	0.0306
<b>M</b>	0.0325
<b>M + s</b>	0.0344
<b>M + 2s</b>	0.0363
<b>M + 3s</b>	0.0383
<b>M + 4s</b>	0.0402

M = media; (n)s = n veces la desviación estándar = (n)(0.0019)

**Gráfico 5.10 Dispersión de los valores de absorbancia de los blancos reactivo**



por lo que se obtuvo el LD, mediante la ecuación:

$$LD = Y_b + 2s_b$$

$$LD = 0.0325 + (2) (0.0019) = 0.0363$$

por medio de la ecuación de la recta de la curva promedio (Gráfico 5.11) se realizó un cambio de variable, para obtener el valor del LD en términos de concentración (C) en µg/L, por lo que:

$$LD = 0.016 C + 0.0021$$

$$C = \frac{0.0363 - 0.0021}{0.016} = 2.14$$

$$\text{Límite de detección} = 2.1 \mu\text{g/L}$$

## b) Límite de cuantificación

El límite de cuantificación es definido como la concentración más baja a la cual el analito puede cuantificarse con una precisión y veracidad aceptables bajo las condiciones experimentales establecidas. Al igual que el límite de detección se establece mediante el nivel de ruido, con la diferencia de que la desviación estándar de señal del blanco se multiplica por diez.

$$\text{Límite de cuantificación (LC)} = Y_b + 10s_b$$

$$\text{LC} = 0.0325 + (10)(0.0019) = 0.0517$$

Realizando el mismo cambio de variable que en el caso del límite de detección para obtener la concentración, se encuentra que:

$$C = \frac{0.0825 - 0.0021}{0.016} = 3.10$$

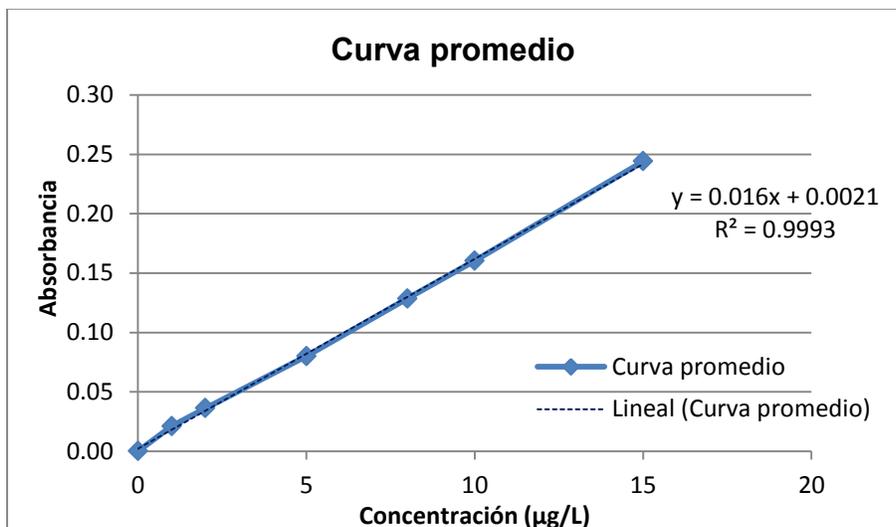
$$\text{Límite de cuantificación} = 3.1 \mu\text{g/L}$$

Para convertir los valores de absorbancia de los límites de detección y de cuantificación en valores de concentraciones se trazó una curva de calibración promedio (Tabla 5.13, Gráfico 5.11) con los valores de las nueve curvas de calibración de Hg obtenidas.

**Tabla 5.13 Curva de calibración promedio de Hg**

Muestra	Conc. ( $\mu\text{g/L}$ )	Abs.
Blanco	0	0.0000
Estándar 1	1	0.0211
Estándar 2	2	0.0362
Estándar 3	5	0.0800
Estándar 4	8	0.1285
Estándar 5	10	0.1604
Estándar 6	15	0.2441

**Gráfico 5.11 Curva de calibración promedio de Hg**



## 5.2. Poblaciones de estudio

Una vez recolectados los datos y muestras de cabello de cada participante de ambas poblaciones, se asignó a cada muestra un código de identificación para mantener la confidencialidad de los voluntarios, realizando posteriormente el análisis de las muestras.

### 5.2.1 Población no expuesta ocupacionalmente (Comunidad estudiantil al sur de la Ciudad de México)

En esta población se obtuvo la participación de 36 personas, 18 hombres y 18 mujeres, por lo que el código de identificación de muestras utilizado se basó en el género, asignando (H: Hombre; M: Mujer) seguido de un número del 1 al 18, correspondiente al número de participante. Por medio del análisis químico por espectrofotometría de absorción atómica de las muestras de cabello se obtuvo la concentración de Hg (Tabla 5.14 y Tabla 5.15) de cada uno de los voluntarios.

**Tabla 5.14 Concentración de Hg en hombres**

Código	m <sub>cabello</sub> (g)	Conc. (µg/g)
H1	0.0569	2.20
H2	0.1498	0.83
H3	0.0839	1.49
H4	0.0367	3.41
H5	0.1142	1.09
H6	0.1000	1.25
H7	0.0147	8.50
H8	0.0559	2.24
H9	0.0230	5.43
H10	0.0628	1.99
H11	0.0901	1.39
H12	0.1328	0.94
H13	0.0902	1.39
H14	0.0161	7.76
H15	0.0157	7.96
H16	0.0726	1.72
H17	0.0892	2.00
H18	0.3738	0.33

**Tabla 5.15 Concentración de Hg en mujeres**

Código	m <sub>cabello</sub> (g)	Conc. (µg/g)
M1	0.0474	2.64
M2	0.0540	2.31
M3	0.0203	6.16
M4	0.1088	1.15
M5	0.1267	0.99
M6	0.0550	2.27
M7	0.0284	4.40
M8	0.0436	2.87
M9	0.0435	2.87
M10	0.0704	1.78
M11	0.0389	3.21
M12	0.0737	1.70
M13	0.0563	2.22
M14	0.0726	1.72
M15	0.0597	2.09
M16	0.0628	1.99
M17	0.2058	0.61
M18	0.0747	1.67

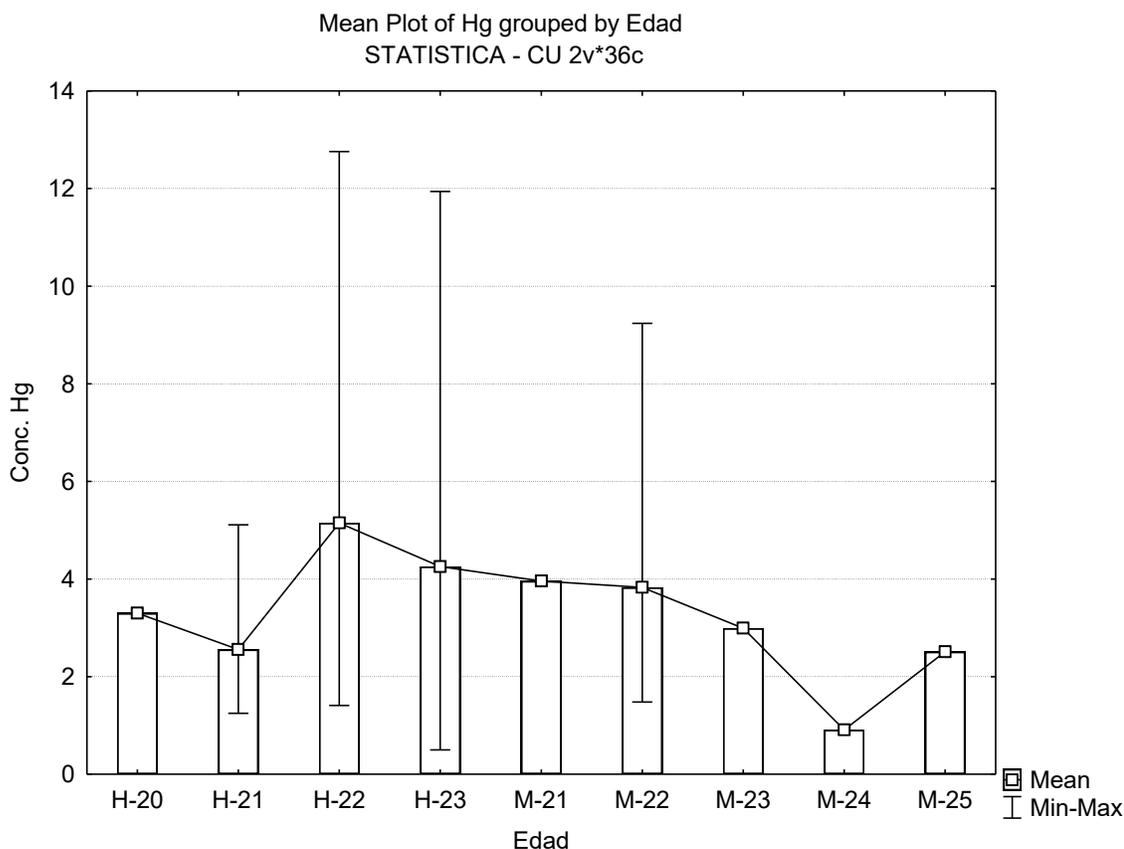
En la tabla 5.16 se muestran los parámetros estadísticos de las concentraciones obtenidas de Hg para los participantes de acuerdo con el género.

**Tabla 5.16 Parámetros estadísticos de las concentraciones de Hg por género (n = 36)**

Género	Conc. promedio (µg/g)	Conc. máxima (µg/g)	Conc. mínima (µg/g)	D.E. (µg/g)
<b>Hombres</b>	2.88	8.50	0.33	2.64
<b>Mujeres</b>	2.37	6.16	0.61	1.29

A los datos obtenidos se les aplicó un análisis estadístico de medidas de tendencia central y grado de variabilidad, con la finalidad de ver la ubicación de los datos, su dispersión con respecto a la media y la posibilidad de presentar una distribución normal. Se realizaron pruebas de correlación (Spearman) entre las principales variables presentes (género y edad). Para todos los análisis estadísticos se utilizó el programa StatSoft, Inc. versión 2010.

**Gráfico 5.12 Diagrama de cajas y bigotes de concentración de Hg contra edad**



Con la representación visual de los datos obtenidos (Gráfico 5.12) de cajas y bigotes se logró identificar de manera simple la normalidad y la variabilidad o dispersión de éstos. Dicho gráfico consta de un rectángulo (la caja) con dos líneas (los bigotes) que se extienden desde los bordes opuestos de la caja y otra línea adicional dentro de la caja, cruzándola en paralelo a los mismos bordes. Los extremos de los bigotes indican el intervalo de los datos, los bordes de la caja a partir de los cuales salen los trazos representan los cuartiles inferior y superior, la línea que cruza la caja representa la mediana de los datos, mientras que las líneas que salen de la caja representan una extensión de la región del intervalo percentil, dando el valor máximo y mínimo al final de cada línea. El punto dentro de la caja muestra la ubicación de la mediana, los puntos que se encuentran fuera de esta región se consideran observaciones extremas.

Se observa mayor dispersión en los datos obtenidos para la población masculina, principalmente en la de 23 años de edad, seguida de la de 22 y 21 años, mientras que el resto no presenta dispersión debido al número de participantes con los que se contó de la

misma edad. Para la población femenina sólo se observa dispersión en las voluntarias de 22 años.

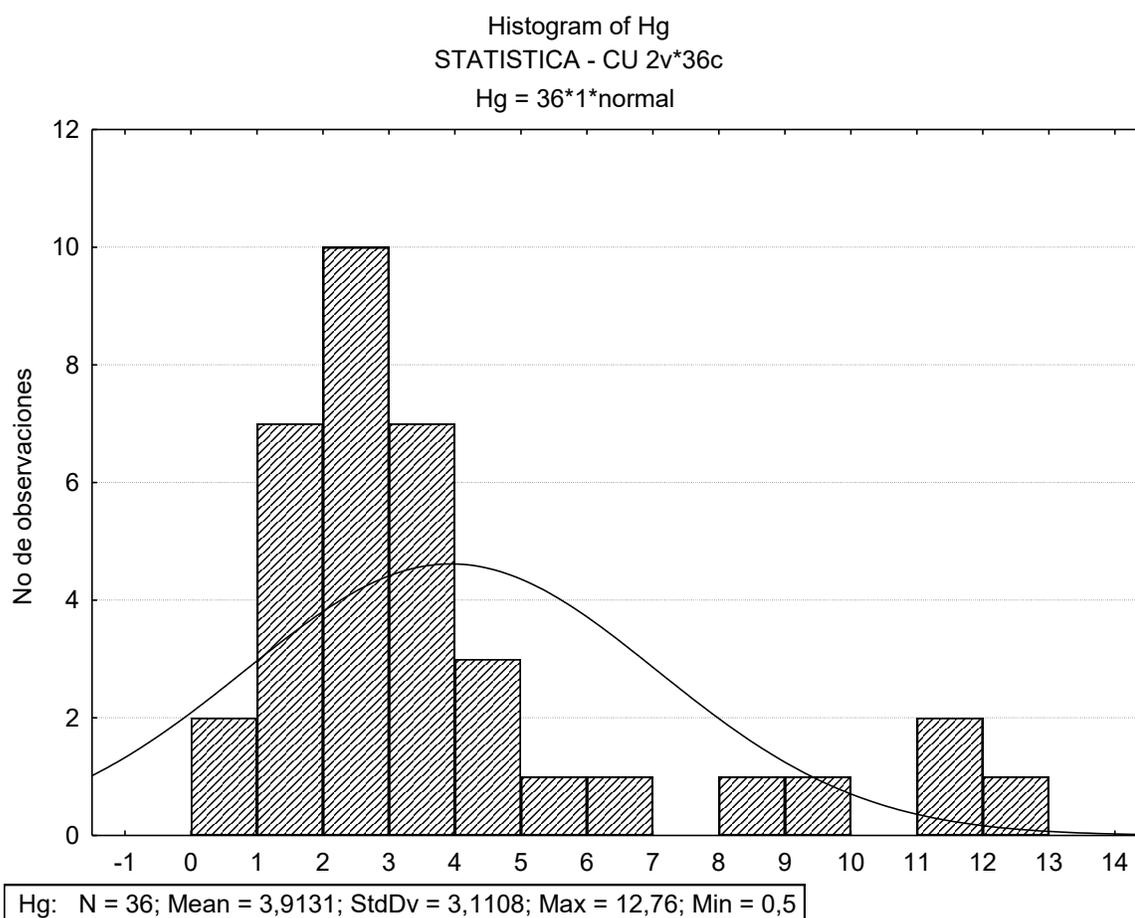
Se utilizó el coeficiente de correlación por rangos de Spearman como un estadístico de prueba para verificar la independencia entre la concentración total de Hg en toda la campaña de muestreo. Así mismo, se utilizó para identificar la independencia entre dos variables (edad y concentración de Hg). El objetivo principal de usar esta técnica es conocer si existe una fuente común entre género y si están correlacionadas entre sí.

Por medio de los gráficos de histogramas de frecuencia se observa que los datos de los valores medios y desviación estándar se encuentran por arriba de los valores permitidos por la OMS, EPA y otras agencias nacionales e internacionales, esto refleja que los errores aleatorios de edad y género se encuentran bajo control de variables de movilidad, habitación y alimenticias, siendo éstas variables no controlables. Cabe mencionar que para el cálculo de la concentración de Hg se utilizó el LD obtenido anteriormente ( $2.1 \mu\text{g/L}$ ), ya que en el análisis químico las concentraciones de las muestras se encontraron por debajo de éste.

Con estos histogramas de frecuencia se observa que el 86 % de la población en estudio rebasa al menos al doble el límite permisible establecido ( $1 \mu\text{g/g}$ ) tomando en cuenta que no es una comunidad con alto consumo de mariscos, esto se puede deber a factores de exposición ambiental, así como al uso de productos para el cabello, principalmente tintes, ya que se detectó que al menos dos de las participantes con mayor concentración de Hg suelen teñir su cabello periódicamente, además de que el hombre con mayor concentración de Hg es el único que utiliza dichos productos.

El histograma de frecuencia de dispersión de Hg para hombres y mujeres (Gráfico 5.13), representa que el 38.88 % de los datos se encuentran en el intervalo de concentración  $1 - 2 \mu\text{g/g}$ , mientras que el 25 % está en el intervalo  $2 - 3 \mu\text{g/g}$ , el 5.55 % se encuentra en el intervalo  $3 - 4 \mu\text{g/g}$  al igual que otro 5.55 % en  $7 - 8 \mu\text{g/g}$ , dando como resultado que más del 60% de la población en estudio se encuentra en el intervalo de concentración de  $1 - 4 \mu\text{g/g}$  de Hg, rebasando por tanto el valor permisible en hasta cuatro veces.

**Gráfico 5.13 Histograma de frecuencia de dispersión de Hg para hombres y mujeres**

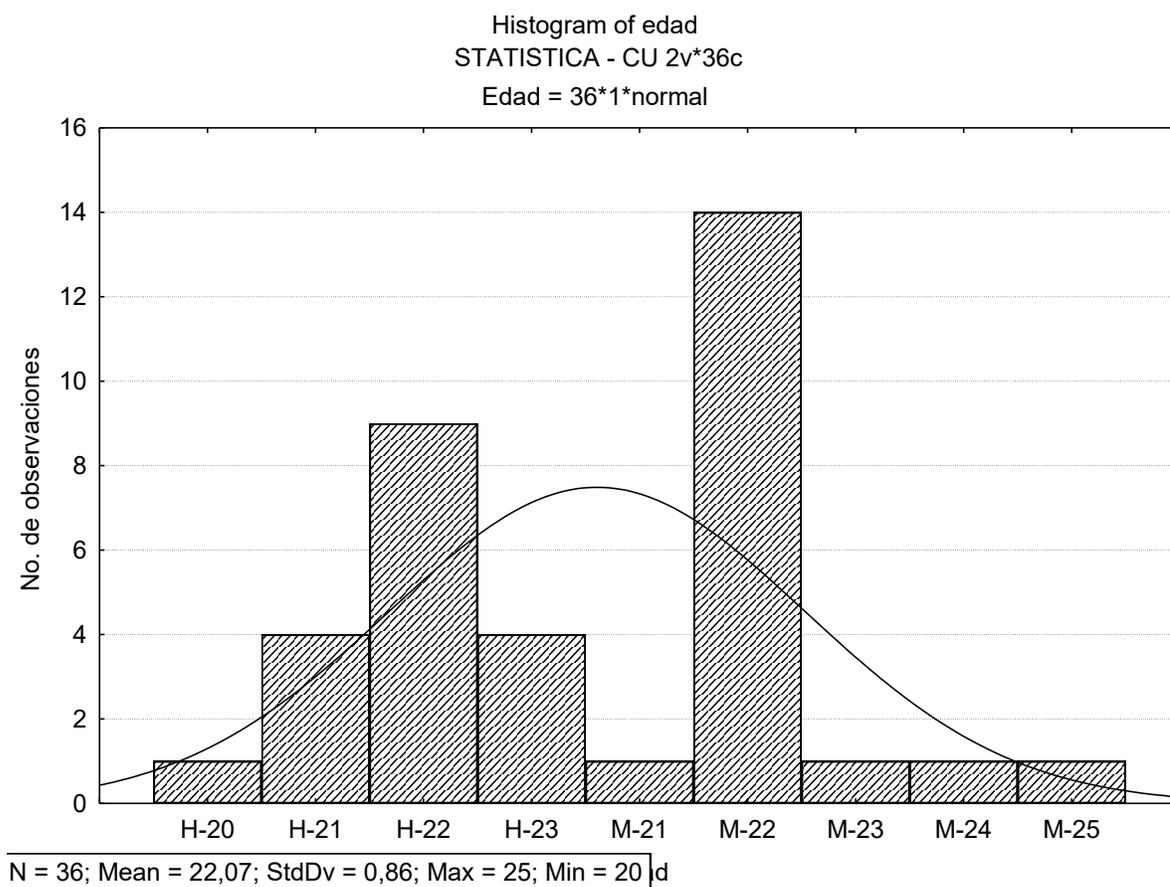


En la Tabla 5.17 queda descrita la clasificación por género y edad de los participantes de esta población; en el Gráfico 5.14 de histograma de frecuencia se muestra que para ambos géneros se contó con mayor participación de personas de 22 años de edad, observando mayor variabilidad en el intervalo de edad en hombres que en mujeres de las demás edades.

**Tabla 5.17 Clasificación de los participantes por género y edad (n = 36)**

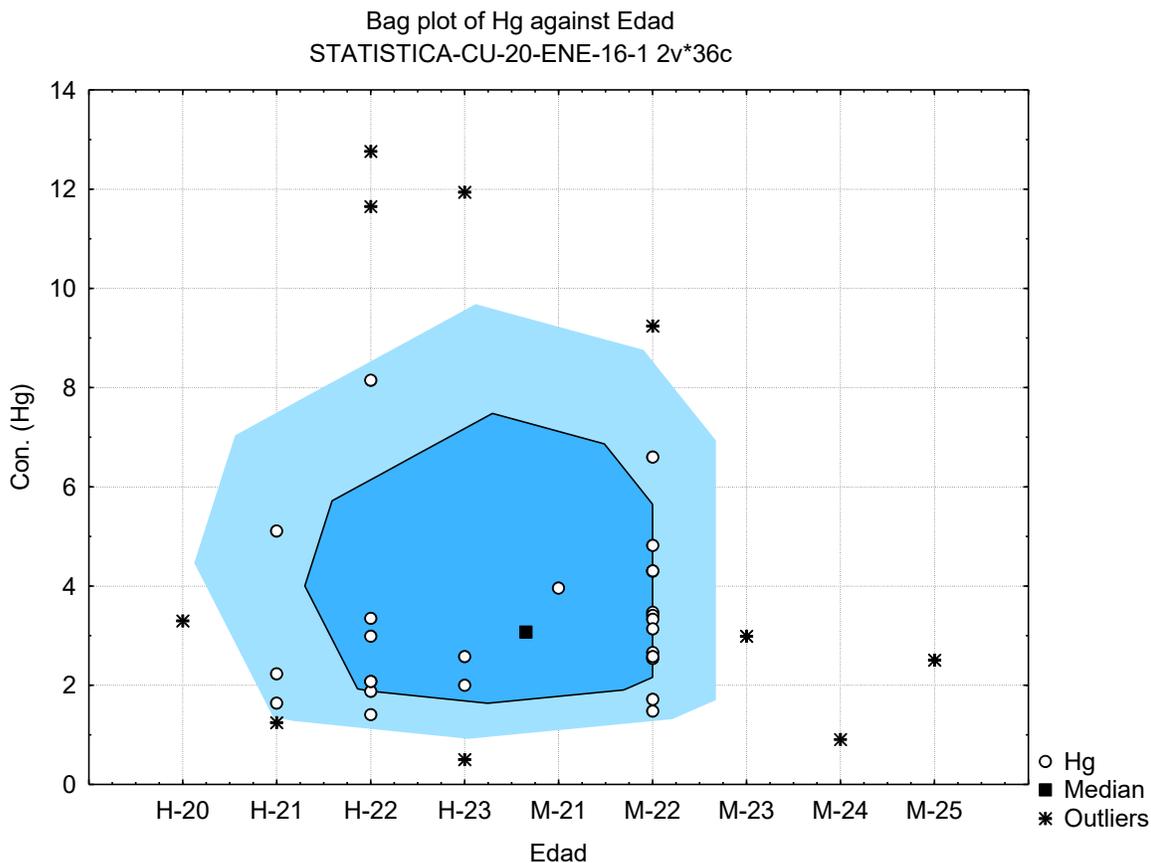
Género	n	máximo (años)	mínimo (años)	media	D.E.
<b>Hombres</b>	18	23	20	21.87	0.83
<b>Mujeres</b>	18	25	21	22.26	0.89
<b>Total</b>	36	25	20	22.07	0.86

**Gráfico 5.14 Histograma de frecuencia de hombres y mujeres respecto a la edad**



Las variables presentes en el estudio fueron tratadas como dependientes o independientes, tomando sólo dos valores (binarias) o varios (categóricas, nominales) siguiendo a veces un orden (ordinales) o tomando cualquier valor en una escala numérica (continuas). En el Gráfico 5.15 se observa un caso especial de variables independientes para esta población de estudio en donde se identifica una amplia dispersión de los datos con respecto a la edad y el género, además de 10 datos atípicos, debidos a dicha dispersión.

**Gráfico 5.15 Diagrama de dispersión y variabilidad de Hg para hombres y mujeres con respecto a la edad**



Todos los participantes de esta población representan una comunidad estudiantil al sur de la Ciudad de México, sus domicilios pertenecen a diversas partes de la ZMCM. Por ello se relacionó la concentración de Hg con respecto a la frecuencia y porcentaje de distribución según su ubicación geográfica (Tabla 5.18), tomando como punto de referencia el Distrito Federal, agrupando así la delegación o municipio al que pertenece su domicilio en: Centro, Norte, Sur, Este y Oeste.

Observando la concentración de Hg más alta en participantes con domicilios ubicados al Este de la ZMCM, seguidos de los que viven al Norte, Centro y Oeste, identificando que los participantes que viven en la zona Sur en general presentan las concentraciones más bajas.

**Tabla 5.18 Concentración de Hg con respecto a la frecuencia y porcentaje de distribución de los participantes clasificados por ubicación geográfica (n= 36)**

Ubicación	Frecuencia	%	Conc. máx. (µg/g)	Conc. mín. (µg/g)	Conc. prom. (µg/g)	D.E. (µg/g)
Centro	6	16.67	7.76	0.99	2.89	2.45
Norte	8	22.22	7.96	0.61	2.86	2.38
Sur	2	5.55	1.99	1.49	1.74	0.35
Este	14	38.89	8.5	0.33	2.46	2.24
Oeste	6	16.67	5.43	1.39	2.73	1.52
<b>Total</b>	<b>36</b>	<b>100</b>				

La Encuesta Tiempo – Actividad (Anexo 1) aplicada a los participantes de esta población se dividió en cinco secciones. Los resultados de la sección “**situación ocupacional**” quedan descritos en la Tabla 5.19, en donde los datos más importantes a destacar son: ¿Actualmente trabaja? y, ¿Cerca de los lugares que frecuenta (hogar, trabajo, escuela) hay algún tipo de industria?; con estas interrogantes se pretende observar las diversas zonas en las que los participantes se encuentran estrechamente expuestos a contaminantes o en su defecto a contaminación por Hg dentro de la ZMCM.

**Tabla 5.19 Frecuencia relacionada a la situación ocupacional de los participantes (n= 36)**

Situación		Hombres		Mujeres	
		Frecuencia	%	Frecuencia	%
¿Actualmente trabaja?	Sí	1	5.6	3	16.7
	No	17	94.4	15	83.3
<b>Total</b>		<b>18</b>	<b>100</b>	<b>18</b>	<b>100</b>
¿Cerca de los lugares que frecuenta, hay algún tipo de industria?	Sí	1	5.6	6	33.3
	No	17	94.4	12	66.7
<b>Total</b>		<b>18</b>	<b>100</b>	<b>18</b>	<b>100</b>

La frecuencia y porcentaje de frecuencia de los “**hábitos alimenticios**” (Tabla 5.20) más influyentes en la posible contaminación con Hg por medio de ingesta, son:

**a)** Consumo de alimentos en la calle, en donde de una manera resumida las opciones “muy esporádicamente” y “nunca” se consideran como “**No consumo**”, mientras que las opciones de consumo: “todos los días”, “de lunes a viernes” y “fines de semana” se consideran como “**Sí consumo**”.

b) Identificación del consumo de mariscos a la semana, dando como posibles opciones de consumo: ninguna, una, dos, tres o más de tres veces a la semana.

c) Frecuencia de consumo de frutas y productos lácteos por día, según las opciones propuestas (ninguno, uno, dos, tres, más de tres).

**Tabla 5.20 Frecuencia de los hábitos alimenticios, clasificados de acuerdo con el género de los participantes (n= 36)**

Hábito alimenticio		Hombres		Mujeres	
		Frecuencia	%	Frecuencia	%
Consumo de comida en la calle	Sí	11	61.11	14	77.78
	No	7	38.89	4	22.22
Consumo de mariscos (por semana)	0	11	61.11	12	66.67
	1	6	33.33	5	27.77
	2	1	5.56	0	0
	3	0	0	1	5.56
	más de 3	0	0	0	0
Consumo de frutas (al día)	0	1	5.56	2	11.17
	1	6	33.33	7	38.89
	2	4	22.22	5	27.77
	3	4	22.22	1	5.56
	más de 3	3	16.67	3	16.61
Consumo de lácteos (al día)	0	1	5.56	0	0
	1	6	33.33	11	61.11
	2	5	27.77	3	16.61
	3	5	27.77	2	11.17
	más de 3	1	5.56	2	11.17

Con respecto a la sección de “**higiene personal**” los aspectos a destacar son: la utilización de tratamientos capilares (acondicionador, cremas para peinar y tintes), así como el uso de productos aclaradores (cremas y jabones) (Tabla 5.21), ya que en la literatura se reporta que estos productos tienen cierto contenido de Hg en alguna de sus formas.

**Tabla 5.21 Frecuencia de uso de productos con contenido de Hg, clasificados de acuerdo con el género de los participantes (n= 36)**

Producto utilizado		Hombres		Mujeres	
		Frecuencia	%	Frecuencia	%
Crema para peinar, acondicionador o tintes	Sí	6	33.33	14	77.78
	No	12	66.64	4	22.22
<b>Total</b>		18	100	18	100
Cremas o jabones aclaradores	Sí	0	0	3	16.67
	No	18	100	15	83.33
<b>Total</b>		18	100	18	100

Por último la sección de “**salud bucal**” nos proporciona información acerca del número de amalgamas dentales que tiene cada uno de los participantes (Tabla 5.22), esta información es útil debido a que al masticar y con la salivación se presenta la liberación del Hg que éstas contienen, por lo que se estaría produciendo contaminación por ingesta de Hg.

**Tabla 5.22 Frecuencia del número de amalgamas dentales de los participantes (n= 36)**

Salud bucal		Hombres		Mujeres	
		Frecuencia	%	Frecuencia	%
Número de amalgamas dentales	0	9	50	14	77.77
	1	1	5.56	1	5.56
	2	2	11.11	1	5.56
	3	2	11.11	2	11.11
	4	2	11.11	0	0
	5	1	5.56	0	0
	más de 5	1	5.56	0	0

### **5.2.2 Población ocupacionalmente expuesta (Región minera, San Joaquín).**

Para esta población se contó con la participación de 24 mineros que laboraban en ese momento en alguna de las 6 minas que fueron visitadas en la región minera de San Joaquín, a excepción de un voluntario que laboró con anterioridad en una mina, el cual actualmente se dedica a trabajos de carpintería.

El código de identificación de muestras se asignó de acuerdo con la inicial del nombre de la mina a la que pertenecía el participante (P: Pozas, R: El Rosario, O: El Otatal, A: Atenea, M: La Maravilla, F: Fortaleza y C: Carpintería), seguida de un número consecutivo

(1, 2,...,) según el número de voluntarios de los que se obtuvo muestra en cada una de las minas y la concentración de Hg (Tabla 5.23).

**Tabla 5.23 Concentración de Hg en mineros (n = 24)**

Código	m <sub>cabello</sub> (g)	Conc. (µg/g)
P1	0.2161	16.40
P2	0.2201	16.57
P3	0.0888	115.10
P4	0.0088	65.29
R1	0.0562	68.57
R2	0.101	2.88
R3	0.1643	10.08
R4	0.116	62.24
R5	0.116	11.05
R6	0.2386	3.90
R7	0.1404	121.60
R8	0.2653	5.21
O1	0.0182	40.38
O2	0.1494	7.13
O3	0.0296	142.56
O4	0.0872	16.39
A1	0.0448	5.79
A2	0.0482	28.20
M1	0.0768	2.44
F1	0.1239	4.00
F2	0.1004	6.62
F3	0.1447	3.15
F4	0.0255	13.21
C1	0.2657	0.80

En la tabla 5.24 se muestran los parámetros estadísticos de las concentraciones de Hg obtenidas para el grupo de estudio.

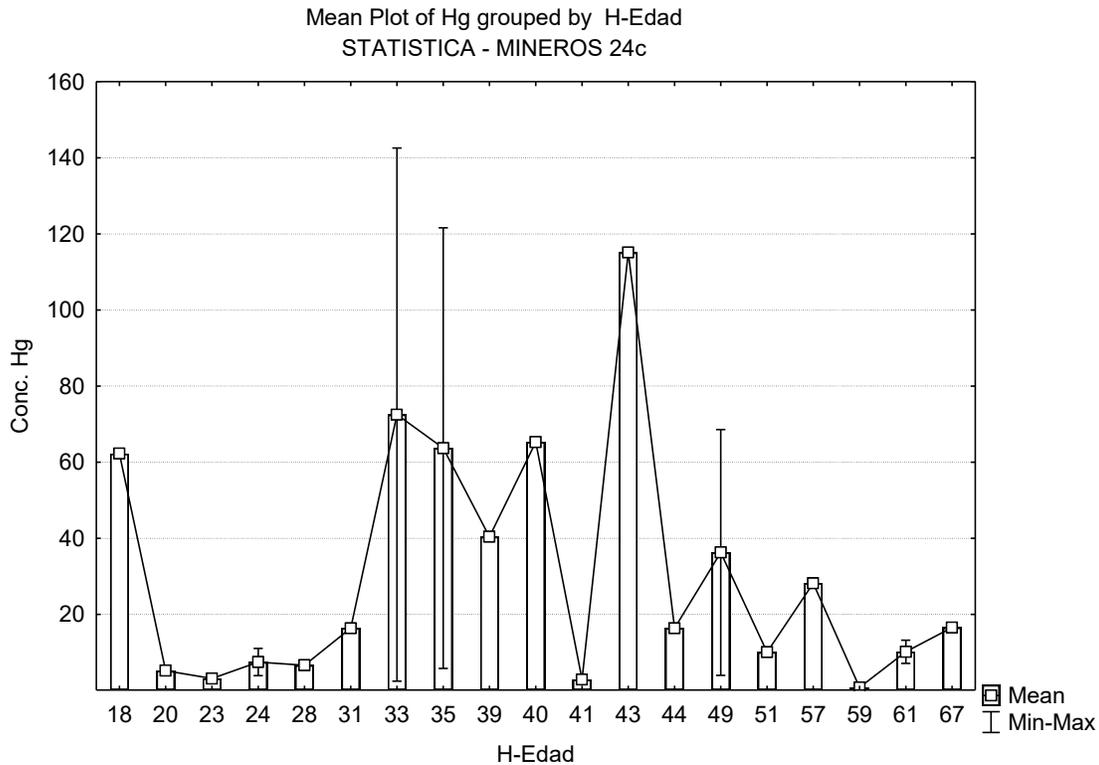
**Tabla 5.24 Parámetros estadísticos de las concentraciones de Hg (n = 24)**

Conc. promedio (µg/g)	Conc. máxima (µg/g)	Conc. mínima (µg/g)	D.E. (µg/g)
32.07	142.56	0.80	41.89

Al igual que para la población estudiantil se aplicó un análisis estadístico de medidas de tendencia central y grado de variabilidad, por lo que se obtuvo un diagrama de cajas y bigotes (Gráfico 5.16) relacionando la concentración de Hg obtenida para cada

participante de acuerdo con su edad, ubicando los datos con respecto a la media de la población, observando que hay gran dispersión en el intervalo de edad (de 18 a 67 años) y en algunos de los intervalos de concentración de Hg de los participantes con la misma edad, como es el caso de los de 33, 35 y 49 años principalmente.

**Gráfico 5.16 Diagrama de cajas y bigotes de concentración de Hg contra edad**



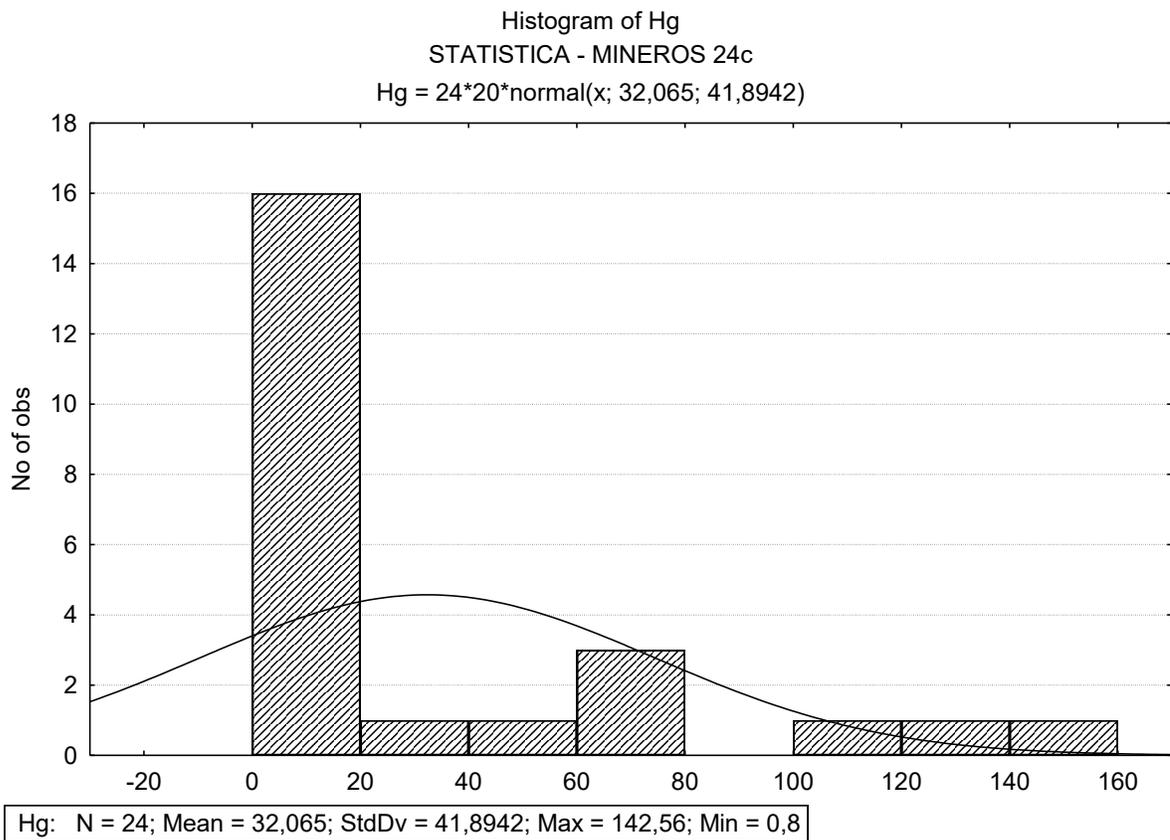
Con respecto a la información obtenida a partir de la encuesta tiempo – actividad (Anexo 2) aplicada a esta población, se observa que en general los voluntarios no consumen mariscos y su alimentación se basa en una dieta más balanceada al ingerir alimentos preparados en casa, además de consumir más de tres frutas y verduras al día; entre las bebidas de su dieta se encuentra principalmente la leche, ya que después de salir de las minas, consideran les sirve para desintoxicarse.

La sección de donde es posible obtener mayor información es la de “**efectos sobre la salud**” en donde se obtuvo información acerca de cuánto y en cuántas minas han laborado los participantes, ya sea de Hg o de otros metales. Observando que la jornada de trabajo en la mayoría de las minas es de ocho horas, tiempo en el que permanecen dentro

de éstas realizando la extracción de cinabrio, para su posterior fundición; por lo que se ven expuestos principalmente a vapores de  $Hg^0$  que se encuentra sobre el mineral.

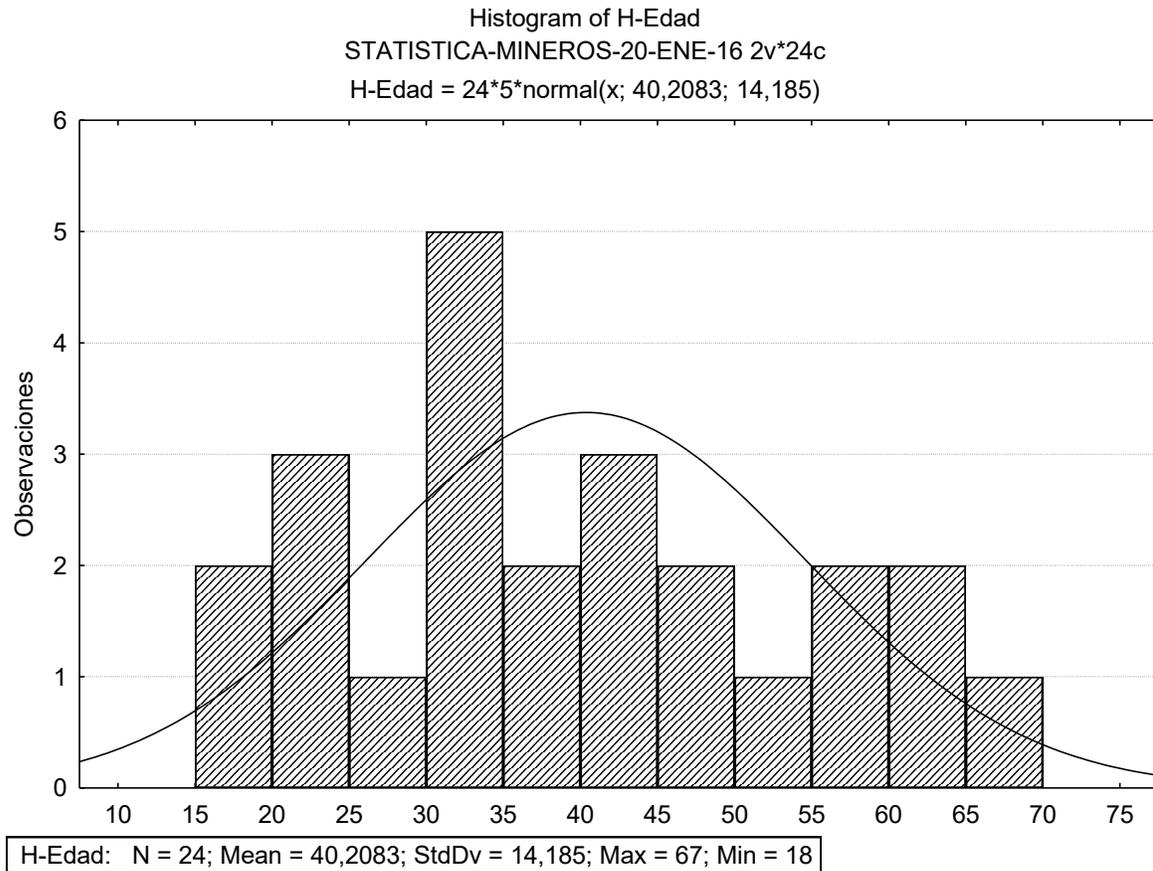
Como primer punto para esta población de estudio se realizó un análisis exploratorio a fin de detectar valores extraños debidos a los datos observados y a la amplia dispersión de ellos para lo que se trabajaron las herramientas gráficas disponibles (histogramas de frecuencia, gráficos de caja, de tallo y de dispersión). El histograma de frecuencia de dispersión de Hg (Gráfico 5.17) muestra que más del 60 % de los datos se encuentran en el intervalo de concentración de Hg de 0 - 20  $\mu g/g$  con una frecuencia igual a 16; descartando los valores de concentración de Hg menores a 10  $\mu g/g$ , se observa que el 54 % de la población rebasa el valor permisible reportado por la ONU, OPS, entre otras (10  $\mu g/g$ ) como valor límite para personas ocupacionalmente expuestas, tomando en cuenta que este valor reportado es para exposición odontológica, ya que no se cuenta con un valor reportado para exposición ocupacional en actividades mineras.

**Gráfico 5.17 Histograma de frecuencia de dispersión de Hg**



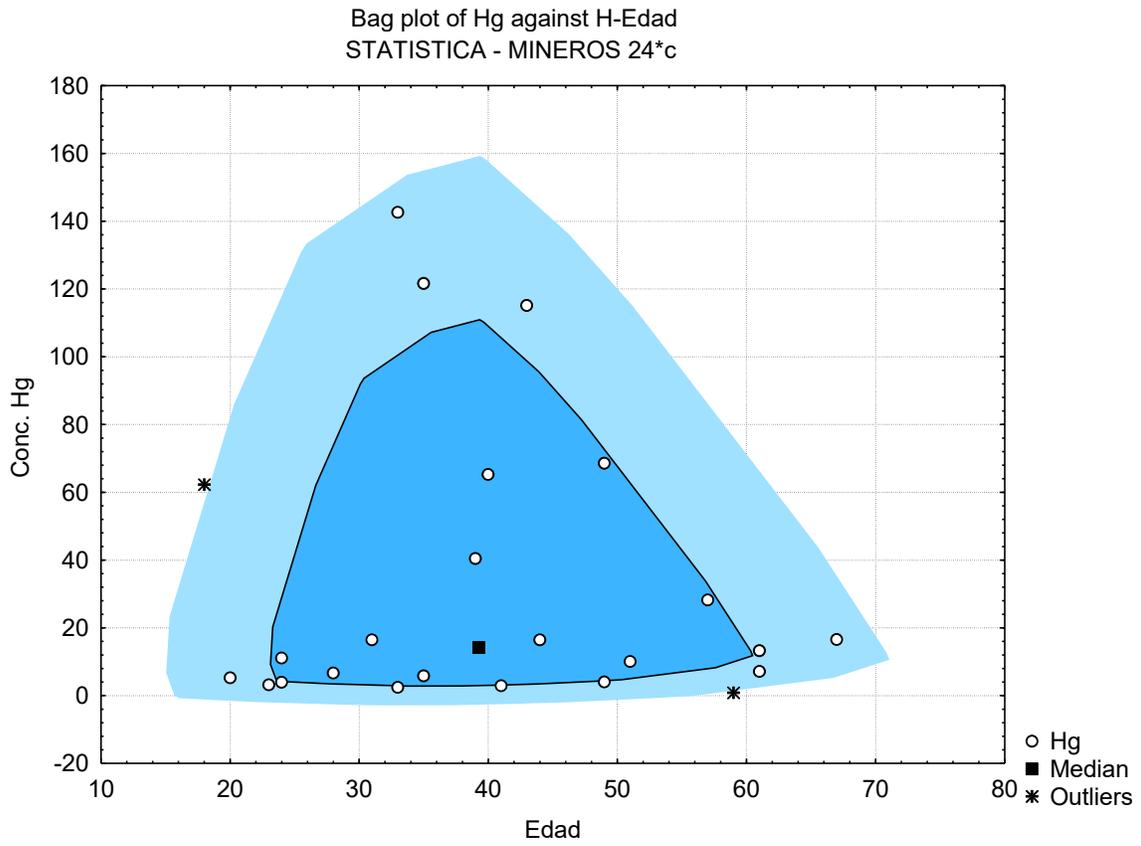
En el Gráfico 5.18 de histograma de frecuencia se muestra el número de observaciones clasificadas de acuerdo con la edad de los participantes, observando que el 20 % de la población se encuentra en un intervalo de edad entre 31 y 35 años, mientras que un 12.5 % está entre 21 y 25 años y otro 12.5 % entre 41 y 45 años, para los demás datos se observa menor dispersión ya que se cuenta con un menor número de voluntarios de dichas edades.

**Gráfico 5.18 Histograma de frecuencia con respecto a la edad**



A los datos de esta población también se les aplicó un análisis de medida de tendencia central (media o mediana, desvío (y error estándar) o intervalo, e intervalo de confianza); debido a la dispersión de los datos sólo permitió trabajar con un análisis estadístico simple (Gráfico 5.19) en el que se observa gran dispersión entre los datos y con respecto a la mediana, además de dos valores atípicos, uno en un participante de 18 años y el otro en uno de 59 años de edad.

**Gráfico 5.19 Diagrama de dispersión y variabilidad de Hg con respecto a la edad**



## CAPÍTULO VI

### 6. CONCLUSIONES

- ☞ Con base en los resultados obtenidos en esta investigación, se observa que las concentraciones de Hg en cabello de ambas poblaciones se encuentran por arriba de los límites permisibles establecidos por Agencias Nacionales e Internacionales (EPA, OMS, OPS, entre otras), lo que representa un riesgo para la salud.
- ☞ Con respecto al método de análisis se concluye que para personas no expuestas ocupacionalmente se debe de contar con una masa mayor de cabello debido a las bajas concentraciones de Hg que estas presentan.
- ☞ El cabello (material biológico) constituye una herramienta útil para el monitoreo de Hg en exposiciones de tipo ocupacional.
- ☞ El valor promedio de concentración de Hg detectado en la población no expuesta ocupacionalmente rebasa el límite establecido en 1-2 veces, observando una gran dispersión en los valores obtenidos para la población de estudio.
- ☞ La concentración de Hg en cabello de la población de la ZMCM varía significativamente debido probablemente a fuentes antropogénicas locales en las zonas principalmente al norte del Distrito Federal.
- ☞ Por medio de la información obtenida a través de la encuesta tiempo-actividad se observa que el uso de tratamientos capilares, como el tinte y productos aclaradores (cremas y jabones) son factores importantes en el aumento de los niveles de Hg, siendo su utilización una variable independiente del género y la edad.
- ☞ El estudio fue relevante para observar que el nivel de Hg en hombres es mayor al que presentan las mujeres en la población no expuesta ocupacionalmente, lo que se atribuye a hábitos alimenticios, ya que los hombres guardan una dieta más rica en cuanto el consumo de mariscos, mientras que las mujeres además de consumir menos este tipo de alimentos, suelen consumir con mayor frecuencia frutas y productos lácteos.
- ☞ En lo que respecta a la población minera, los niveles de Hg detectados rebasan los límites establecidos con los que se cuenta para exposición ocupacional (actividad odontológica) en casi cinco veces, cabe mencionar que no hay normas ni valores oficiales relacionados a la exposición en actividades de minería, siendo el proceso de

extracción de Hg a partir de cinabrio altamente riesgoso para el ambiente, la salud de los mineros e incluso de la población de la región en general.

- ☞ En la población minera se observa que a pesar de que se desecha el Hg de manera natural, la absorción y procesos de bioacumulación probablemente promueven altos niveles de este metal en el organismo.
- ☞ En virtud de que diariamente los vertimientos de la minería son arrojados a los cuerpos de agua sin ningún tipo de tratamiento, el presente estudio muestra la magnitud de la contaminación por Hg en la población y la incidencia de la misma sobre su salud.
- ☞ A pesar de que ambas poblaciones rebasan los límites permisibles, se observa que entre ellas existe un gran intervalo en la diferencia de los valores de la concentración de Hg obtenidos, ya que la comunidad estudiantil (población control) no está expuesta de forma rigurosa como lo está la población de la región minera.

## Referencias

1. Academia Nacional de Medicina (ANM), 2003. *Seminario Internacional sobre clínica del mercurio*. Memorias. Antioquia, Colombia.
2. Álvarez Alonso, José, 2013. *Riesgos del mercurio para la biodiversidad y la minería ilegal*. Ministerio del Ambiente, Perú.
3. Cámara Minera de México (CMM), 2015. *Situación de la minería en México en 2014*. LXXVIII Asamblea General Ordinaria.
4. Carretero L. M. y P. R., Manuel, 2007. *Mineralogía aplicada: salud y medio ambiente*. Ed. International Thomson, Madrid. 337-403.
5. Castro Díaz, José, 2011. *Informe sobre el mercado del mercurio en México*. Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA).
6. Centro Coordinador Convenio Basilea, Centro Regional Convenio de Estocolmo para América Latina y el Caribe (CCCB-CRCE), 2014. *El Convenio de Minamata sobre el Mercurio y su implementación en la región de América Latina y el Caribe*.
7. Cespón Romero, Rosa María, 2001. *Desarrollo de métodos analíticos automáticos para la determinación de metales en el medio ambiente laboral*. USC, Barcelona. 391-429.
8. Contreras Carlos, 1999. *El reemplazo del beneficio de patio en la minería peruana*. Revista de Indias. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España. Vol. LIX, núm. 216. 391-416.
9. De la Rosa, D.A., Volke Sepúlveda, T., Solórzano C., Green, R. Tordon, S. Beauchamp, 2004. *Survey of Atmospheric Total Gaseous Mercury in Mexico*. Atmospheric Environment, (38). 4839-4846.
10. Di Bernardo, María Luisa, Ysabel García, María, Zago, Karina Isabel, R. Luna, José, Hernández. Yajaira, Rincón Jacinto, Mejías Richart, Yañez Carlos, Velásquez Yarima, Morales, Yasmin, 2010. *Evaluación de la matriz pelo como válida para la determinación de contaminación por mercurio en mineros artesanales del Estado Bolívar–Venezuela*. Grupo de Investigación en Toxicología Analítica y Estudios Farmacológicos (GITAEF). Facultad de Farmacia y Bioanálisis, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
11. Echegaray, R. y Gómez, M., 1984. *Determinación de mercurio en cabello como expresión de la exposición a mercurio*. Bol. Lima, 6 (31): 92.
12. Elías Castells, Xavier y Ruíz Álvarez Francesc, 2012. *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Ed. Díaz de Santos, Madrid. 265 - 267.
13. Environment Science and Technology (ES&T), 2006. *Metales pesados tóxicos: el mercurio*. Química inorgánica ambiental, vol. 40, No 4.

14. Español Cano, Santiago, 2001. *Toxicología del mercurio. Actuaciones preventivas en sanidad laboral y ambiental*. Jornada internacional sobre el impacto ambiental del mercurio utilizado por la minería aurífera artesanal en Iberoamérica, Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). Lima, Perú.
15. F. Lang, Mervin, 1999. *Azoguería y amalgamación. Una apreciación de sus esencias químico-metalúrgicas, sus mejoras y su valor tecnológico en el marco científico de la época colonial*. Universidad de Salford. LLULL, vol. 22. 655-673.
16. Ferro N., A., 2010. *Proyectos mineros y aguas subterráneas en México: El caso de acuífero Vizcaíno*. México.
17. G. Rochow, Eugene, 1981. *Química inorgánica descriptiva*. Ed. Reverté, España. 250 - 258.
18. Galvão L., A. y Corey G., 1987. *Mercurio*. Serie vigilancia 8. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Panamericana de la Salud (OPS).
19. García Niño, Grecia Carolina, 2010. *Determinación de mercurio por generación de vapor frío y detección vía absorción y fluorescencia atómica*. Tesis de Licenciatura en Química. Universidad Simón Bolívar.
20. Higuera P., Esbrí J. M., Oyarzun R., Lorenzo S., Llanos W., Martínez Coronado A., López Berdonces M. A., García Noguero E. M., 2010. *Mercurio en Almadén: desde su origen hasta su incorporación al medio ambiente*. Departamento de Explotación y Prospección de Minas, Universidad de Oviedo. 273 – 325.
21. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2007. *Clasificación Mexicana de Actividades y Productos, Censos Económicos*. 3ª reimpresión. D.F., México.
22. Instituto Nacional para la Educación de los Adultos (INEA), 2014. *Geografía del Estado de Querétaro*. Consejo Nacional de Educación para la Vida y el Trabajo (CONEVYT).
23. Jernelov, Arne, 2003. *Catástrofes ambientales*. Instituto Internacional de Análisis de Sistemas Aplicados en Viena, Organización de las Naciones Unidas (ONU).
24. López Osorno, Sally Patricia, 2013. *Concentración de mercurio en cabello de una muestra de la población adulta de Yucatán, estudio descriptivo*. Tesis de Maestría en Ciencias. Unidad Mérida departamento de Ecología Humana. Cinvestav, IPN. Mérida Yucatán, México.
25. M. Berg, Jeremy, L. Tymoczko John y Styer Lubert, 2008. *Bioquímica*. Ed. Reverté. 6ª ed, Barcelona. 1 026.
26. Martínez Trinidad Sergio, Hernández Silva Gilberto, Ramírez Islas Martha Elena, Martínez Reyes Juventino, Solorio Munguía Gregorio, Solís Valdez Sara y García Martínez Rocío, 2013. *Mercurio: el hombre y la naturaleza al sur de la Sierra Gorda de Querétaro, México. Memorias de los trabajos realizados de 2006 a 2008 por Universidades, Institutos y Centros de Investigación de México y Hungría. Geofísica Internacional*. (52), vol. 1. 43-58.

27. Mermet Alejandro, Gabriel, 2005. *Ventilación natural de edificios*. Ed. Nobuko, 1ª ed. Buenos aires. pg. 31.
28. Ministerio del Medio Ambiente de Japón (MMAJ), 2013. *Enseñanzas de la enfermedad de Minamata y el manejo del mercurio en Japón*. Ed. División de la Salud y Seguridad Medioambiental, Departamento de Salud Ambiental.
29. Muro Ruíz, Eliseo, 2005. *La minería mexicana, su evolución, retos y perspectivas*. Instituto de Investigaciones Jurídicas, UNAM.
30. Murray J., V., 1995. *Toxic teeth; the chronic mercury poisoning of modern man*. Chemistry and Industry. 14-17.
31. Norma Mexicana NMX-EC-17025-IMNC-2006. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. Instituto Mexicano de Normalización y Certificación.
32. Olivero Jesús, Mendoza Claudia, Mestre Judith, 1995. *Mercurio en cabello de diferentes grupos ocupacionales en una zona minera aurífera en el Norte de Colombia*. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas, Universidad de Cartagena. Colombia. Saúde Pública, 29 (5). 376 – 379.
33. Organización Mundial de la Salud (OMS), 2013. *EL mercurio y la salud*. Nota descriptiva N°361.
34. Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud (OPS-OMS), 2011. *Teoría y práctica para el fortalecimiento de la vigilancia de la salud de poblaciones expuestas a mercurio*. La Paz. Bolivia.
35. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), 2002. *Evaluación mundial sobre el mercurio*. Productos químicos. Ginebra, Suiza.
36. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), 2010. *Informe relativo a la información sobre los sistemas armonizados para medir la carga corporal de mercurio*. Segundo periodo de sesiones, Japón.
37. Programa Nacional de Riesgos Químicos (PNRQ), 2007. *Movimiento mundial para el cuidado de la salud libre de mercurio*. Ministerio de Salud de la Nación, Proyecto BAN-HG.
38. Ramírez Ortiz, Jorge, 2006. *El beneficio de los minerales de plata por amalgamación*. Unidad Académica de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Zacatecas.
39. Red Internacional de Eliminación de los Contaminantes Orgánicos Persistentes (RIECOP), 2010. Introducción a la contaminación por mercurio para las ONG.
40. Repetto M., 1995. *Toxicología Avanzada*. Capítulo 9: Estado Actual de la Toxicología del Mercurio. Ed. Díaz de Santos, Madrid.
41. Sánchez Ortiz, Guillermo, 2014. *Asesoría a la pequeña minería: conflicto de límites de concesión en el caso de mina Ampliación No 1 la Esperanza, ubicada en el municipio de San*

Joaquín, Querétaro. Tesina en Ingeniería de minas y metalurgia. Facultad de Ingeniería, UNAM.

42. Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA), 2012. *Inventario de emisiones contaminantes y de efecto invernadero*. Zona Metropolitana del Valle de México.
43. Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SMA-GDF), 2012. *Programa de Acción Climática de la Ciudad de México*, Informe final. México.
44. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2013. *Convenio Jurídicamente Vinculante sobre el Mercurio "Convenio de Minamata". Primera Reunión del Estudio "Almacenamiento y Disposición de Mercurio en México"*. México, D.F.
45. Seguridad Química para el Desarrollo Sostenible (SQDS), 2006. *Preocupaciones en materia de salud y medio ambiente asociados con los metales pesados: ¿Necesidad de una acción mundial ulterior?* Hungría.
46. Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2014. *Panorama minero del Estado de Querétaro*. Secretaría de Economía.
47. V. Ramírez, Augusto, 2008. *Intoxicación ocupacional por mercurio*. An Fac Med. (69) 1, Perú. 46-51.
48. World Health Organization (WHO), 2000. *Environment Health Criteria 214, Human Exposure Assessment*. International Programme on Chemical Safety (IPCS), Ginebra. Suiza.
49. World Health Organization (WHO), 2005. *Air Quality Guidelines*. Public Health and Environment.
50. World Health Organization and United Nations Environment Programme (WHO & UNEP), 2008. *Guidance for identifying populations at risk from mercury exposure*.

# ANEXOS

# ANEXO 1

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. FACULTAD DE QUÍMICA, CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA.



## Encuesta Tiempo - Actividad



### Niveles de Mercurio en cabello de una Comunidad Universitaria

Fecha: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

#### Datos personales

Nombre: \_\_\_\_\_

Edad: \_\_\_\_ años

Sexo:  H  M

Dirección: \_\_\_\_\_

Calle, avenida

Número exterior

Número interior

Colonia

Delegación/Municipio

Nivel educativo: \_\_\_\_\_

#### Situación ocupacional

**Estudiante**

❖ Institución: \_\_\_\_\_

❖ Carrera: \_\_\_\_\_

❖ Cuantas horas en promedio al día permanece en su escuela: \_\_\_\_\_

❖ Medio de transporte: \_\_\_\_\_

❖ Tiempo de traslado a su escuela: \_\_\_\_\_

Encuesta Tiempo – Actividad, basada en una recopilación de encuestas realizadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Oficina Nacional de Estadística (ONE) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

(marque con una  su respuesta)

1. ¿Actualmente Trabaja?  Sí  No (vea pregunta 4)

2. ¿Cuántas horas al día trabaja? \_\_\_\_\_

❖ Medio de transporte: \_\_\_\_\_

❖ Tiempo de traslado a su trabajo: \_\_\_\_\_

3. ¿Su trabajo es dentro de alguna industria donde se vea expuesto ocupacionalmente a ciertos niveles de mercurio, metales u otros contaminantes?  Sí  No

En caso de haber respondido sí a la pregunta anterior, mencione cuáles: \_\_\_\_\_

4. ¿Cerca de los lugares que frecuenta (hogar, escuela, trabajo, etc.) hay algún tipo de industria?

Sí  No (vea Hábitos alimenticios)

5. ¿Esta industria se dedica a la elaboración de termómetros, cosméticos o algún producto con emisiones de mercurio, metales u otro tipo de contaminantes?

a) Si

b) No

c) No sé

En caso de haber respondido sí a la pregunta anterior, mencione cuáles: \_\_\_\_\_

### **Hábitos alimenticios** (marque con una su respuesta)

¿Hace usted alguna dieta especial?  Sí  No

¿Cuántas comidas hace al día  1  2  3  más de 3

¿Cuántas entre-comidas suele hacer?  0  1  2  3  más de 3

¿Suele consumir alimentos de la calle?  Sí  No

¿Con que frecuencia suele comer fuera de su casa?

a) Todos los días

d) De lunes a viernes

b) Fines de semana

e) Nunca

c) Muy esporádicamente

d) Otro (especifique): \_\_\_\_\_

¿Con que frecuencia suele comer fuera de su casa?

d) Todos los días

d) De lunes a viernes

e) Fines de semana

e) Nunca

f) Muy esporádicamente

d) Otro (especifique): \_\_\_\_\_



4. ¿Con qué frecuencia hace uso de estos tratamientos?

**Acondicionador y/o cremas para peinar:**

- a) Diario  
b) Una vez por semana  
c) Cada 15 días  
d) Otro (especifique): \_\_\_\_\_

**Tintes:**

- a) Cada mes  
b) Cada tres meses  
c) Cada año  
e) Otro (especifique): \_\_\_\_\_

5. ¿Cuándo fue la última vez que tiño su cabello? \_\_\_\_\_

6. ¿Utiliza algún tipo de crema corporal o facial aclaradora?

- a) Facial      b) Corporal      c) Ambas      d) Ninguna (vea pregunta 9)

7. ¿Desde cuándo utiliza estos productos? \_\_\_\_\_

8. ¿Son de uso diario?  Sí  No

9. ¿Utiliza algún jabón aclarador de piel?  Sí  No (vea pregunta 11)

10. ¿Desde cuándo utiliza este producto? \_\_\_\_\_

11. ¿Ha revisado alguna vez la etiqueta de estos productos aclaradores?  Sí  No

12. ¿Se ha percatado si indica que estos contienen mercurio?  Sí  No

13. ¿Sabe qué tipo de sales de mercurio y/o mercuriales orgánicos pueden contener estos productos (jabones y/o cremas)?  Sí  No

14. ¿Sabe el nombre “no común” de algunas de estas sales y/o mercuriales orgánicos?  Sí  No

**Salud bucal**

¿Tiene amalgamas?  Sí  No

¿Cuántas amalgamas tiene?

- a) 1      c) 3      e) 5      g) No sé  
b) 2      d) 4      f) más de 5

¿Desde hace cuánto tiene las amalgamas? \_\_\_\_\_

¿Con qué regularidad visita a su dentista? \_\_\_\_\_

## ANEXO 2

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. FACULTAD DE QUÍMICA, CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA.



### Encuesta Tiempo - Actividad



Comunidad ocupacionalmente expuesta en un sitio minero

Fecha: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

#### Datos personales

Nombre: \_\_\_\_\_

Edad: \_\_\_\_ años

Sexo:  H  M

Dirección: \_\_\_\_\_

Calle, avenida

Número exterior

Número interior

Localidad

Municipio

¿Desde cuándo reside en su domicilio actual? \_\_\_\_\_

Nivel educativo: \_\_\_\_\_

(Marque con una  su respuesta)

1. ¿Cuántas horas al día trabaja? \_\_\_\_\_

❖ Medio de transporte: \_\_\_\_\_

❖ Tiempo de traslado a su trabajo: \_\_\_\_\_

Encuesta Tiempo – Actividad, basada en una recopilación de encuestas realizadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Oficina Nacional de Estadística (ONE) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

**Hábitos alimenticios** (marque con una  su respuesta)

¿Hace usted alguna dieta especial?  Si  No

¿Cuántas comidas hace al día?  1  2  3  más de 3

¿Cuántas entre-comidas suele hacer?  0  1  2  3  más de 3

¿Suele consumir alimentos de la calle?  Si  No

¿Con qué frecuencia suele comer fuera de su casa?

- g) Todos los días  
 h) Fines de semana  
 i) Muy esporádicamente  
 d) De lunes a viernes  
 e) Nunca  
 d) Otro (especifique): \_\_\_\_\_

¿Cuántos vasos de los siguientes líquidos consume en promedio a la **semana**?

Líquido	Agua	Café	Jugos	Leche	Vino	Cerveza	Otro (especifique)
# de vasos							

¿Con qué frecuencia consume los siguientes alimentos (Indique la proporción consumida en un día o semana ordinaria)? Marque con una  su respuesta.

Alimento	Ninguna vez	Una vez a la semana	Dos veces a la semana	Tres veces a la semana	Más de tres veces a la semana
➤ Mariscos					
➤ Carne					
➤ Pollo					
➤ Huevo					
➤ Cereales					
➤ Legumbres y/o arroz					
➤ Leguminosas					
Alimento	Ninguna	Una al día	Dos al día	Tres al día	Más de tres al día
➤ Frutas					
➤ Verduras					
➤ Lácteos					
➤ Tortillas o productos de maíz					



**Efectos sobre la salud** (marque con una  su respuesta)

¿Ha trabajado o sido invitado a trabajar en las minas?  Sí  No (Gracias)

¿Qué tipo de minerales se extraían en las minas en las que laboraba? \_\_\_\_\_

---

---

¿Durante cuánto tiempo laboró en esta mina? \_\_\_\_\_

---

¿Actualmente tiene exposición directa a minerales? Mencione cuales: \_\_\_\_\_

---