



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
AMBIENTAL – RESIDUOS PELIGROSOS**

**“EVALUACIÓN DE MERCURIO EN SITIOS CON ACTIVIDAD MINERA
EN MÉXICO”**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA**

PRESENTA:

I.Q. DAVID FERNANDO HUERTA COLOSIA

TUTOR PRINCIPAL:

DRA. GEORGINA FERNANDEZ VILLAGOMEZ, F.I. UNAM

COMITÉ TUTOR

DRA. IRMA CRUZ GAVILÁN GARCÍA, F.Q. UNAM

DR. JOSÉ AGUSTÍN GARCIA REYNOSO, C.C.A UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., DICIEMBRE 2020



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: Dra. Irma Cruz Gavilán García

Secretario: M.A.I. Landy Irene Ramírez Burgos

Vocal: Dr. Luis Raúl Tovar Gálvez

1° Suplente: Dr. José Agustín García Reynoso

2° Suplente: Dra. Georgina Fernández Villagómez

Lugares donde se realizó la tesis: Facultad de Ingeniería UNAM, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático INECC.

TUTOR DE TESIS:

Dra. Georgina Fernández Villagómez

Firma

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Arturo Gavilán García de la Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, por compartir el proyecto para la realización de esta investigación, apoyando con la financiación de los muestreos y con el personal capacitado para cumplir con la logística requerida.

Al Lic. Mauricio Aguilera de la SEDSU – Querétaro por las facilidades prestadas para el desarrollo de los muestreos, así como para el Ing. Leonardo Herrera por su colaboración para establecer contacto con los mineros que permitió el libre trabajo de campo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y su Programa de Posgrado en Ingeniería Ambiental por su formación en campos de interés nacional e internacional para la construcción de un país sustentable.

Al CONACYT por el apoyo económico por medio de su Programa Nacional de Posgrados de Calidad.

A la Dra. Irma Gavilán García de la Unidad de Gestión Ambiental y al Dr. Rodolfo Sosa Echeverría del Centro de Ciencias de la Atmósfera por la facilitación de los equipos complementarios para llevar a cabo los muestreos ambientales, así como su capacitación requerida para utilizarlos de la manera adecuada.

A la Dra. Georgina Fernández Villagómez por su apoyo en la revisión continua de este trabajo.

A los sinodales por brindar su tiempo y paciencia para aportar conocimientos y nuevas ideas para la mejora continua de la tesis.

A todos los mineros que permitieron el acceso a las instalaciones e incluso apoyaron con trabajo de campo, compartiendo sus actividades y costumbres.

DEDICATORIAS

A la Dra. Irma Gavilán, el Dr. Arturo Gavilán y el Mtro. Miguel Martínez por haber confiado en mí a mis inicios de mi vida profesional y mostrando su apoyo, incluyéndome en estos temas de gran interés, enseñándome constantemente las bases para poder desarrollarme laboralmente y tener una visión complementaria para identificar y resolver problemas de carácter global.

A mi equipo de muestreo: Tania Ramírez, Becki Jiménez, Pedro Guadarrama, Miguel Cortés, Esteban Bautista, Israel Calzada, Felipe Ángeles y Miguel Flores. Por su dedicación y apoyo en cualquier actividad que se necesitaba y por la divertida y sana convivencia. Son momentos inolvidables, de algunos obtuve una gran amistad que confío conservar.

A mis amigos que no nos separamos a pesar de esta nueva etapa en donde todos estamos más ocupados: Fanny López, Gricelda Martínez, Pamela Páez, Eduardo Zamora y David García. Compartiendo momentos de diversión y lágrimas y aprendiendo a ser adultos.

A mis nuevos amigos Tania Ramírez, Iván Pérez y Mariana Ayala. Dicen que en el trabajo no se deben hacer amigos, pero me he dado cuenta de que siempre en cualquier lugar hay personas valiosas. Gracias por todo.

A mi familia, siempre pendiente y apoyándome en toda adversidad y triunfo.

A mis niños Armando y Cristian Huerta. En su momento entenderán la importancia de todo este proceso, son maravillosos y siempre estaré ahí para apoyarlos tanto como ustedes sin saberlo me han apoyado. Tienen todo para seguir adelante, los amo.

A mis padres Gabriela Colosia y Eduardo Huerta por su gran paciencia y amor que me tienen. Si bien no han sido los mejores años, los momentos buenos siempre perdurarán sobre los otros. “Luz que nunca sobre para que apreciemos a la noche”. Todo se los debo a ustedes, pido al cielo poder devolverles lo mucho o poco que pueda. Mis eternas gracias y mi incondicional amor para ustedes.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	8
LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS	9
RESUMEN EJECUTIVO	11
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	12
1.1 JUSTIFICACIÓN	12
1.2 OBJETIVOS	15
1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES	15
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 ASPECTOS GENERALES	16
2.1.1. QUÍMICA DEL MERCURIO	16
2.1.2. TOXICOLOGÍA DEL MERCURIO	18
2.1.3. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES EN EL AMBIENTE	21
2.1.4. EL DESASTRE DE MINAMATA	26
2.1.5. EL INVENTARIO NACIONAL DE EMISIONES Y LIBERACIONES DE MERCURIO EN MÉXICO (INELM)	29
2.1.6. MINERÍA PRIMARIA Y PRODUCCIÓN DE MERCURIO EN MÉXICO	33
2.2 LEGISLACIÓN NACIONAL E INTERNACIONAL	38
2.2.1 LEGISLACIÓN NACIONAL	38
2.2.2 EL CONVENIO DE MINAMATA	44
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA	52
3.1 CAMPAÑA DE MUESTREO	52
3.1.1 CAPACITACIÓN PARA USO DE EQUIPOS DE CAMPO	53
3.1.2 SELECCIÓN DEL SITIO DE MUESTREO	53
3.1.3 SOLICITUD DE PERMISOS CORRESPONDIENTES	59
3.1.4 PLAN DE MUESTREO	60
3.1.5 CAMPAÑA DE MUESTREO IN SITU EXPLORATORIO Y DE FONDO	60
3.1.6 ANÁLISIS DE MUESTRAS	62
3.1.7 TRATAMIENTO DE RESULTADOS	63
3.1.8 TRABAJO DE GABINETE	64
3.2 DISEÑO ESTADÍSTICO DE EXPERIMENTOS	64
CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	66

4.1 PRIMER CAMPAÑA – ABRIL, 2019.....	66
4.1.1 MUESTREO EXPLORATORIO DE SUELO “LA SOLEDAD I”	67
4.1.2 MUESTREO EXPLORATORIO DE AIRE “LA SOLEDAD 1”	70
4.1.3 MUESTREO DE FONDO EN SUELO “PUERTA DEL CIELO I”	78
4.1.4 MUESTREO DE FONDO EN AIRE “PUERTA DEL CIELO I”	80
4.2 SEGUNDA CAMPAÑA – AGOSTO, 2019.....	81
4.2.1 MUESTREO DE SUELO “LA SOLEDAD II”	82
4.2.2 MUESTREO DE AIRE “LA SOLEDAD II”	83
4.2.3 MUESTREO DE AGUA “LA SOLEDAD II”	85
4.2.4 MUESTREO EXPLORATORIO EN SUELO “CAMARGO”	87
4.2.5 MUESTREO EXPLORATORIO EN AIRE “CAMARGO”	90
4.2.6 MUESTREO DE FONDO EN SUELO “PUERTA DEL CIELO II”	97
4.2.7 MUESTREO DE FONDO EN AIRE “PUERTA DEL CIELO II”	98
4.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	100
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES	118
ANEXO I. PLANES DE MUESTREO	120
ANEXO II. CURVAS DE CALIBRACIÓN PARA ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA....	138
REFERENCIAS.....	140

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 Ciclo biogeoquímico conceptual del mercurio.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.2 Resultados del INELM, 2015.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 2.3 Contribución de contaminación con mercurio por subcategoría.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 2.4 Modelo estructural general de los depósitos epitermales alcalinos (baja e intermedia sulfuración), indicando la mineralogía de ganga, los patrones de alteración típicos, la variación en la mineralogía de mena típica en profundidad y en la morfología de la mineralización.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 2.5 Localización de los depósitos y manifestaciones de mercurio a nivel nacional.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.1 Metodología propuesta.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 3.2 Metodología para toma de muestras.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 3.3 Metodología para análisis de suelo.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 3.4 Preparación de muestras de suelo.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 4.1 Ubicación de las zonas muestreadas.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 4.2 Proceso de extracción primaria artesanal de mercurio.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 4.3 Mapa de muestreo en suelo Mina “La Soledad” abril 2019.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 4.4 Ruta 1 Muestreo exploratorio en aire “La Soledad” abril 2019.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 4.5 Ruta 2 Muestreo exploratorio en aire “La Soledad” abril 2019.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 4.6 Ruta 3 Muestreo exploratorio en aire “La Soledad” abril 2019.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 4.7 Mapa de muestreo en suelo “Puerta del Cielo” campaña abril 2019.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 4.8 Muestreo de agua “La Soledad” agosto 2019.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 4.9 Mapa de ubicación de puntos muestreados en suelo “Camargo” agosto 2019.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 4.10 Muestreo de aire mina “Camargo” zona de hornos, agosto 2019.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 4.11 Muestreo de aire mina “Camargo” zona de hornos – bocamina, agosto 2019.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 4.12 Muestras de suelo por encima del LMP “La Soledad” abril 2019.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 4.13 Ruta 1 monitoreo de aire “La Soledad” abril 2019.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 4.14 Ruta 2 monitoreo de aire “La Soledad” abril 2019.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 4.15 Ruta 3 Monitoreo de aire “La Soledad” abril 2019.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 4.16 Mapa de poblaciones cercanas a “La Soledad”.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 4.17 Muestras de suelo “Puerta del Cielo” abril 2019.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 4.18 Monitoreo de aire “Puerta del Cielo” abril 2019.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 4.19 Mapa de poblaciones cercanas a “Puerta del Cielo”.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 4.20 Comparación de concentración de mercurio en suelo por temporada.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 4.21 Concentración de mercurio en bocamina “La Soledad”.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 4.22 Concentración de mercurio en zona de hornos “La Soledad” agosto 2019.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 4.23 Concentración de mercurio en suelo, mina “Camargo” agosto, 2019.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 4.24 Monitoreo de mercurio en aire, mina “Camargo” zona de hornos agosto 2019.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 4.25 Monitoreo de mercurio en aire, mina “Camargo” camino Zona de hornos-bocamina agosto 2019.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 4.26 Mapa de poblaciones cercanas a “Camargo”.....</i>	<i>116</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1 Límites máximos permisibles de mercurio en cuerpos de agua.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 2.2 Límites máximos permisibles de exposición a las diversas especies de mercurio.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 2.3 Casos de estudio de población afectada en sitios contaminados.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 2.4 Emisiones y liberaciones de mercurio por matriz ambiental afectada.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 2.5 Distribución de mercurio presente en la extracción de minerales.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 2.6 Normas Mexicanas relacionadas con la minería y emisiones de mercurio.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 2.7 Relevancia política, regulatoria e institucional del proyecto, para cumplir con el Convenio de Minamata.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 3.1 Selección de sitios.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 4.1 Resultados de muestras “La Soledad” campaña abril, 2019.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 4.2 Resultados de monitoreo en aire en la ruta 1 “La Soledad”.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 4.3 Resultados de monitoreo en aire en la ruta 2 “La Soledad”.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 4.4 Resultados de monitoreo en aire en la ruta 3 “La Soledad”.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 4.5 Resultados de muestras “Puerta del Cielo” campaña abril 2019.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 4.6 Concentración de mercurio en muestras de mina “La Soledad” abril 2019.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 4.7 Concentración de mercurio en sitio de fondo “Puerta del Cielo” abril 2019.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 4.8 Resultados muestreo en suelo m ina “La Soledad” campaña agosto 2019.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 4.9 Muestreo de aire en bocamina “La Soledad” agosto 2019.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 4.10 Muestreo de aire en la zona de hornos “La Soledad” agosto 2019.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 4.11 Resultados muestreo en mina “Camargo” campaña agosto 2019.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 4.12 Resultados de monitoreoen aire en la ruta 1 “Camargo”.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 4.13 Resultados de monitoreoen aire en la ruta 2 “Camargo”.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 4.14 Concentración de mercurio en suelo “Puerta del Cielo” campaña agosto 2019.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 4.15 Concentración final de muestras mina “La Soledad” campaña agosto 2019.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 4.16 Muestreo de fondo en aire “Puerta del Cielo” campaña agosto 2019.....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 4.17 Comparación por temporadas de concentración de mercurio en suelo.....</i>	<i>108</i>

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

Siglas/acrónimos	Significado
ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
AGC	Artisanal Gold Council
ARB	Air Resources Board
ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry
CCA	Centro de Ciencias de la Atmósfera
CGCSA	Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental
COP	Conference of Parties
CPEUM	Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos
DGDM	Dirección General de Desarrollo Minero
DGRM	Dirección General de Residuos Mineros
DOF	Diario Oficial de la Federación
ES	Exportadora de Sal
FDA	Food and Drug Administration
FIFOMI	Fideicomiso de Fomento Minero
IMSS	Instituto Mexicano del Seguro Social
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INELM	Inventario Nacional de Emisiones y Liberaciones de Mercurio
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
MIA	Minamata Initial Assessment
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
NOM	Norma Oficial Mexicana
OEHHA	Office of Environmental Health Hazard Assessment

OSHA	Occupational Safety and Health Administration
PECT	Prueba de extracción
PNUMA	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente
SE	Secretaría de Economía
SEDATU	Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano
SEDENA	Secretaría de Defensa Nacional
SEDESU	Secretaría de Desarrollo Sustentable
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SGM	Servicio Geológico Mexicano
SHCP	Secretaría de Hacienda y Crédito Público
SS	Secretaría de Salud
STPS	Secretaría del Trabajo y Previsión Social
UASLP	Universidad Autónoma de San Luis Potosí
UGA	Unidad de Gestión Ambiental
UN	United Nations
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
UNEP	United Nation Environment Program
USEPA	United States Environmental Protection Agency

RESUMEN EJECUTIVO

Con la entrada en vigor del Convenio de Minamata el 16 de agosto de 2017, México al firmar dicho documento, se ha comprometido entre otras actividades a identificar fuentes de suministro de mercurio que generan existencias superiores a 10 Mg por año que estén situados en su territorio, tal como lo dicta el artículo 3º párrafo 5.

Datos estimados en el Inventario Nacional de Emisiones y Liberaciones de Mercurio en México, muestran que la minería primaria de mercurio es la fuente principal de contaminación por este metal en el país (804.6 Mg Hg/año), de aquí la importancia de cuantificar la concentración de mercurio en el ambiente, comparando con los límites recomendados por la legislación nacional e instituciones internacionales.

Se seleccionaron 2 minas en la Sierra Gorda de Querétaro debido a que se ubican en un Área Natural Protegida, por lo que es importante conservar estos espacios libres de contaminantes.

La mina de “La Soledad” presenta concentraciones de mercurio vapor en aire entre los 66 ng/m³ hasta 7,925 ng/m³ en zonas aledañas a la bocamina, mientras que en la zona de hornos alcanza 220,000 ng/m³. En el caso de las muestras de suelo presentan concentraciones de mercurio total de hasta 857 mg/kg. Las muestras en agua determinan concentraciones por debajo de los límites de detección.

En la mina de “Camargo” la concentración de mercurio vapor en aire varía entre 14,000 ng/m³ y 51,300 ng/m³ en zonas aledañas a la bocamina. En zona de hornos alcanza los 142,800 ng/m³. En suelo, alcanzan concentraciones de mercurio total de 2,0333 mg/kg. No hay presentes cuerpos de agua cercanos.

Comparado con los valores referencia de 1000 ng/m³ para mercurio vapor en aire y de 310 mg/kg de mercurio total en suelo. Los sitios seleccionados rebasan en mayor parte estas concentraciones, por lo cual se consideran sitios contaminados con probable daño a la salud de la población laboral y local.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN

El mercurio ocupa aproximadamente el lugar 66 en abundancia relativa respecto a los demás elementos de la tabla periódica (SGM, 2017). Es un elemento metálico líquido altamente tóxico y dañino para el ambiente. Sus liberaciones se pueden dar por causas naturales y antropogénicas. Es por esto que el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA o UNEP por sus siglas en inglés) formó un comité para elaborar el “Convenio de Minamata”, el cual entró en vigor el 16 de agosto de 2017, cuyo objetivo es proteger la salud humana y el medio ambiente de las emisiones y liberaciones antropogénicas de mercurio y compuestos de mercurio (PNUMA, 2017). Como parte de las obligaciones que adquiere cada país al firmar el Convenio, se debe elaborar un inventario, en el cual se debe cuantificar de la manera más precisa posible, la cantidad de mercurio que se libera al ambiente proveniente de las diversas fuentes emisoras identificadas.

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) por medio de la Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental (CGCSA) fue el responsable de elaborar dicho inventario para México denominado “Inventario Nacional de Emisiones y Liberaciones de Mercurio” (INELM); derivado de los resultados, una de las categorías más contaminantes es la de “extracción y producción primaria de metales” tales como el oro, plata, cobre, zinc, plomo, arrabio y principalmente la producción de mercurio.

Aunque las concentraciones promedio del mercurio en la corteza terrestre se encuentran aproximadamente entre 0.05 a 0.08 ppm, este elemento llega a presentarse en cantidades mucho mayores, asociado a yacimientos minerales de origen hidrotermal de baja temperatura, en proporciones que van desde 10 a más de 20,000 ppb (SGM, 2017). La pureza de los metales extraídos depende de varios factores como la geología de la zona o los procesos de extracción, por lo cual, idealmente, cada país participante del Convenio debe tener sus estudios particulares de la concentración de mercurio, dando así un mayor grado de exactitud a los inventarios.

El mercurio además de liberarse por la producción primaria del mismo metal también está presente como impureza a niveles traza en la producción de otros metales. México está identificado como una de las principales zonas de reservas de mercurio en el mundo (INECC, 2001).

Actualmente se cuentan con datos de concentración traza de mercurio en la producción de diversos metales como el cobre o el plomo, sin embargo, en la minería primaria de mercurio no se tienen los valores de las concentraciones liberadas al ambiente de las minas en México, lo cual, en caso de tenerlos, contribuiría en gran parte a establecer un panorama mundial sobre la cantidad de mercurio emitida, liberada y en reserva.

La principal región productora de mercurio en México, se encuentra en la Sierra Gorda de Querétaro, en la región central de la Sierra Madre Oriental (Diaz-Barriga, 2017), por lo cual son lugares clave para realizar estos estudios y presentarlos ante la Conferencia de las Partes (COP por sus siglas en inglés), reunión anual en la cual todos los países participantes en el Convenio de Minamata, se reúnen para revisar los diagnósticos de cada nación y evaluar los proyectos futuros en los cuales es importante invertir recursos para mitigar los aspectos ambientales y socioeconómicos.

El PNUMA, en virtud de proveer las guías para que las naciones participantes en el Convenio de Minamata realicen sus inventarios nacionales de emisiones y liberaciones de mercurio, provee valores generales del factor de entrada para cada categoría involucrada con la contaminación con mercurio en su manual "Toolkit for Identification and Quantification of Mercury Sources". Este "factor de entrada" se refiere a la cantidad de mercurio que hay presente en un proceso o producto determinado, expresado en las unidades [kg Hg/Tonelada de material producido] o [g Hg/pieza producida], para efectos de este trabajo, se utilizarán mega gramos (Mg) como equivalente de toneladas.

México utilizó estos valores de PNUMA en su primera elaboración del INELM, sin embargo, al ser uno de los países con mayor producción de mercurio a nivel mundial, se ha comprometido a establecer estos factores de entrada específicos para México, ya que estos son variables dependiendo de la región en cada país (PNUMA, 2015).

El INECC cuenta con equipos de medición de mercurio en ambiente como el “Lumex RA 915⁺” preparados para monitorear mercurio en las zonas requeridas, por lo que se plantean los siguientes objetivos:

1.2 OBJETIVOS

Objetivo general:

Llevar a cabo la evaluación de mercurio en sitios con actividad minera en México considerando como caso de estudio las condiciones ambientales de una zona cercana a una mina y planta de beneficio.

Objetivos particulares:

- Analizar los resultados del Inventario Nacional de Emisiones y Liberaciones de Mercurio (INELM) realizado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) considerando la actividad minera en México.
- Realizar los estudios de contaminación ambiental de minas de mercurio activas con una producción anual de al menos 10 Mg, mediante la toma y análisis de muestras de diversas matrices ambientales.
- Evaluar el grado de contaminación ambiental de los sitios debido a la presencia de mercurio, comparando los resultados obtenidos con los límites máximos permisibles establecidos por organismos internacionales y regulación nacional.

1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES

- Las determinaciones de las concentraciones de mercurio se realizarán utilizando un equipo Lumex RA 915⁺.
- Los límites de detección del Lumex RA 915+ es de 2 ng/m³ para aire ambiente, 0.5 ng/l en la matriz agua y 0.5 µg/kg para el suelo. Los equipos pueden llegar a dañarse si la concentración de la zona es elevada.
- Las determinaciones se realizarán en los alrededores de al menos una mina, considerando el radio de afectación y el probable daño a la población aledaña.
- Las determinaciones se realizarán en temporada de secas de acuerdo con los permisos obtenidos de las autoridades competentes.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describirá la química y toxicología del mercurio en sus diferentes especies existentes, también se expondrá el desastre de Minamata, evento por el cual, entre otros factores, detonó en la creación del Convenio de Minamata; además de las bases del INELM de la cual nacen las necesidades de revisión de la minería primaria en México, llegando así hasta la extracción y producción de mercurio.

2.1 ASPECTOS GENERALES

2.1.1. QUÍMICA DEL MERCURIO

El mercurio es un elemento metálico de alta densidad (13.5g/cm^3) con número atómico 80 y peso molar de 200.59 g/mol (Wiley and Sons, 2001). Es ligeramente volátil a temperatura ambiente y se solidifica a una presión de 7,640 atmósferas. Se disuelve en ácido nítrico y ácido sulfúrico concentrados, pero es resistente a los álcalis. Tiene un punto de fusión de -39°C , un punto de ebullición de 357°C y una densidad relativa de 13.5 (Wiley and Sons, 2001; Kirk & Othmer, 1967) y se presenta en la naturaleza en el planeta debido a las reservas geológicas y se libera por procesos naturales como la actividad geológica y volcánica y en productos y procesos industriales como la minería, combustión de carbón, incineración de residuos, uso en termómetros, lámparas, amalgamas dentales, entre otros.

En el ambiente, el mercurio puede presentarse en diversas formas: el mercurio metálico o elemental, diversos compuestos de mercurio inorgánico, metil mercurio y otros compuestos orgánicos (USEPA, 2018). El mercurio elemental es líquido a temperatura ambiente y presenta un color plateado, es volátil a temperatura ambiente e incrementa proporcionalmente con la temperatura; el cinabrio es la mena más importante de mercurio (HgS) (Casas, 2002) ; finalmente el mercurio orgánico en forma de metil mercurio es la forma más tóxica y bioacumulativa del mercurio, y se produce principalmente en ecosistemas acuáticos a través de procesos bacterianos naturales (UNEP, 2013).

El ciclo biogeoquímico conceptual del mercurio que se describe en la Figura 2.1, muestra como el mercurio se emite a la atmósfera desde fuentes naturales o en algunos casos

industrial. El mercurio en la atmósfera puede depositarse en el suelo o en cuerpos de agua y en el agua puede sedimentar. El mercurio en agua, suelo y en sedimentos se puede metilar y desmetilar. El metil mercurio en agua puede bioacumularse en organismos acuáticos. Hay dos principales tipos de reacciones en el ciclo del mercurio, que lo convierten en diversas formas: reacciones óxido-reducción y reacciones metilación desmetilación. En las reacciones óxido reducción el mercurio se oxida a su más alta valencia (2^+) a través de la pérdida de electrones, o el mercurio se reduce hasta su más baja valencia (0) (Government of Canada, 2013).

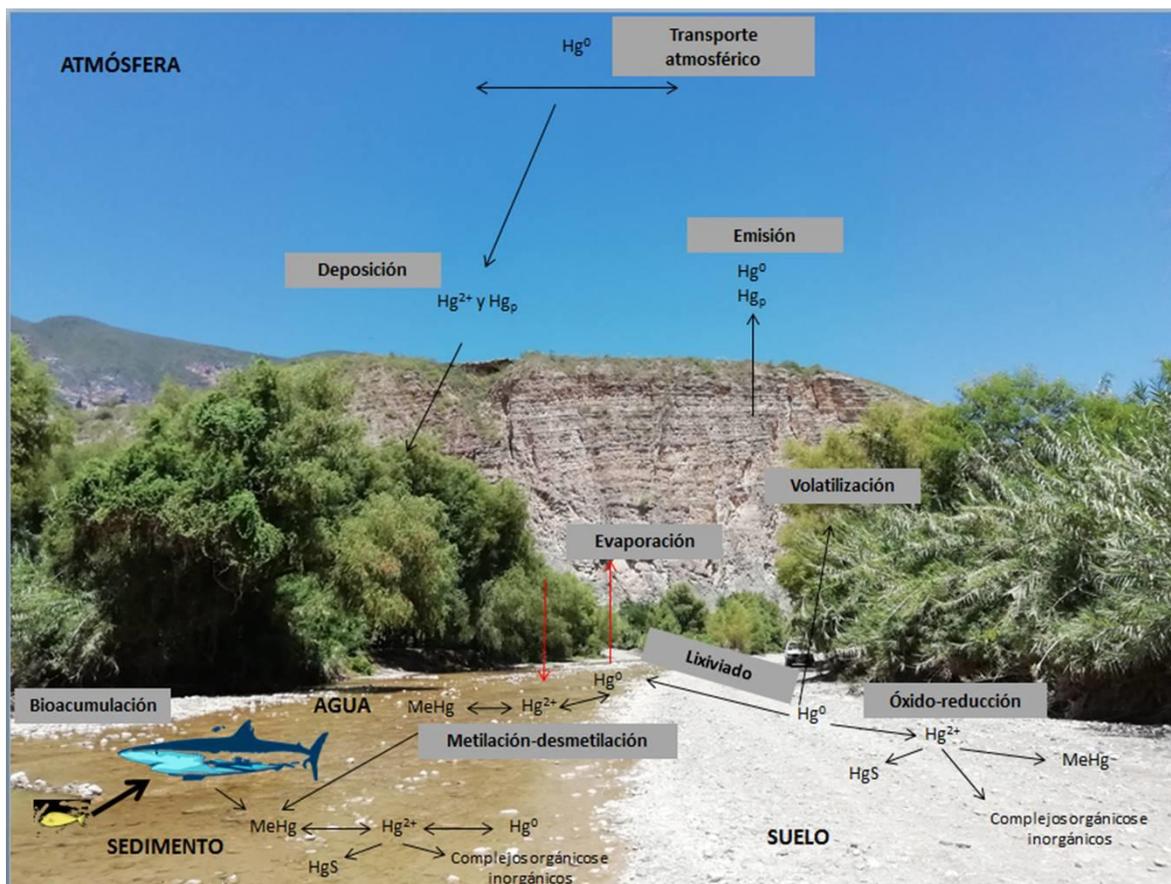


Figura 2.1 Ciclo biogeoquímico conceptual del mercurio. Fuente: Elaboración propia

El mercurio metálico Hg^0 es la especie de mercurio más abundante en la atmósfera comprendiendo aproximadamente el 90% del mercurio atmosférico total (Lyman & et.al., 2007), es ligeramente soluble en agua (0.056 mg/L a $25^{\circ}C$) (ATSDR, 1999) y principalmente se oxida a Hg^{2+} por la reacción con oxidantes atmosféricos como el oxígeno, el ozono o el cloro. Esta especie es la menos toxica debido a que no es muy

soluble en agua y no se adhiere fácilmente a los tejidos animales ni microorganismos (Khandaker & et.al., 2018). Cuando se encuentra en su forma oxidada, este es mucho más soluble en agua por lo cual puede precipitar con la lluvia (Mendioroz, 2001).

En el suelo o en sedimentos, el mercurio es predominantemente Hg^{2+} , sin embargo, se puede reducir a Hg^0 para volatilizar a la atmósfera. Su concentración en la corteza terrestre es de 0.5 ppm, en su mayoría se puede encontrar combinado con azufre, formando múltiples compuestos diferentes. De estos compuestos, el más importante de ellos comercialmente, es el sulfuro rojo o cinabrio (HgS). El metal obtenido puede tener una pureza hasta de 99.9% y si se desea una pureza mayor, se purifica por destilación múltiple o refinamiento electrolítico. A partir de este mineral es de donde se obtiene el mercurio metálico principalmente (Soria, 1999). El proceso de extracción comúnmente utilizado en el beneficio de mercurio en hornos artesanales es a partir de la trituración del mineral, calentándolo y condensando el mercurio emitido (Hg^0). En el horneado el cinabrio se descompone en Hg^0 y azufre, este Hg^0 se oxida a Hg^{2+} , que en el suelo y agua forma compuestos metilados; los residuos que contienen cinabrio “crudo” y Hg^{2+} se dispersan debido a su alta acidez (Zepeda, 2017).

El mercurio puede metilarse por acción de microorganismos y formar el Metil mercurio ($MeHg$), el metil mercurio es el compuesto orgánico de mercurio más tóxico para el ser humano y el ambiente debido a su capacidad de bioacumulación y biomagnificación (UNEP, 2013).

2.1.2. TOXICOLOGÍA DEL MERCURIO

La Administración de Drogas y Alimentos de los Estados Unidos (FDA por sus siglas en inglés) estima que la mayoría de las personas están expuestas a un promedio de aproximadamente de 50 ng de mercurio por kilogramo de peso al día en los alimentos que consumen. Esto corresponde aproximadamente a 3.5 microgramos de mercurio al día para un adulto de peso promedio. Se cree que este nivel no produce efectos adversos (ATSDR, 2016).

La Agencia de Protección ambiental de Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency, USEPA) y la Administración de Alimentos y Medicamentos (Food and Drug Administration, FDA) han establecido un límite para mercurio inorgánico en el

agua potable de 2 ppb. La USEPA también recomienda que los niveles de mercurio inorgánico en ríos, lagos y arroyos no excedan 144 ppt y ha determinado que es improbable que la ingesta diaria de 2 ppb (para un adulto de peso corporal promedio) de mercurio inorgánico en el agua potable cause efectos adversos de importancia para la salud (ATSDR, 2016).

La Administración de Salud y Seguridad Ocupacional, (Occupational Safety and Health Administration, OSHA) ha establecido límites de 0.1 mg/m^3 de aire para mercurio orgánico y 0.5 mg/m^3 para vapor de mercurio metálico en el aire del trabajo para proteger a los trabajadores durante una jornada de 8 horas diarias, 40 horas a la semana. El Instituto Nacional de Salud y Seguridad Ocupacional (Nation Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH) recomienda que la cantidad de vapor de mercurio metálico en el aire del trabajo se limite a un promedio de 0.05 mg/m^3 durante una jornada de 10 horas. La Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA) and the Air Resources Board (ARB) de California EE. UU., recomienda $0.06 \mu\text{g/m}^3$ en 8 horas, $0.03 \mu\text{g/m}^3$ para exposición crónica y 1.6 ppm de ingesta oral diaria.

La vía de ingreso del mercurio al organismo principalmente es en vapor por medio de la inhalación. Se calcula que aproximadamente un 80-85% es absorbido por los pulmones (Holmes & et.al., 2009). Las otras vías de ingreso como la ingestión y la dérmica registran menos del 1% del mercurio elemental absorbido (Counter & Buchanan, 2004).

El mercurio elemental se oxida intracelularmente por acción de la enzima catalasa y el peróxido de hidrógeno a mercurio inorgánico Hg^{2+} (Holmes & et.al., 2009). Parte del mercurio elemental es excretado en sudor y saliva (Lyn, 2002), y como Hg^{2+} en orina y heces (Counter & Buchanan, 2004). El mercurio elemental presenta un perfil de eliminación bifásico. La primera fase con un tiempo de vida media de 2 a 4 días, y la segunda fase de 15 a 30 días (Artisanal Gold Council, 2014).

Los vapores de mercurio elemental producen efectos adversos en los pulmones, posteriormente se presentan síntomas como temblores, cambios emocionales, insomnio, cambios neuromusculares, dolores de cabeza, alteración en las sensaciones, cambios en las respuestas nerviosas y déficit en la función cognitiva (Diaz-Barriga, 2017). Además, la

exposición a altas concentraciones de mercurio metálico produce daños en los riñones, e incluso la muerte (USEPA, 2014).

En cuanto al mercurio inorgánico, éste se puede formar por el metabolismo de los vapores de mercurio elemental por oxidación biológica o por el metabolismo del metilmercurio por desmetilación por actividad de la microflora intestinal (Lyn, 2002). El mercurio inorgánico se adquiere principalmente por ingesta donde entre el 2 y el 38% del metal se absorbe en el tracto gastrointestinal (Holmes & et.al., 2009). Este mercurio normalmente no atraviesa la placenta o la barrera hematoencefálica; sin embargo, se puede encontrar en el cerebro de neonatos, debido a la ausencia de una barrera hematoencefálica completamente formada (Counter & Buchanan, 2004). El mercurio inorgánico se une a la metalotioneína e induce su biosíntesis (Lyn, 2002), por lo que se puede acumular en los riñones (Syversen & Kaur, 2012). También puede formar complejos con el glutatión en el hígado y secretarse en la bilis como un complejo cisteína-mercurio o glutatión-mercurio (Lyn, 2002).

El mercurio inorgánico principalmente se elimina por la orina, pero también puede ser eliminado en la bilis, heces, aire exhalado, cabello, sudor, leche materna y saliva (Holmes & et.al., 2009). Su tiempo de vida media para la eliminación es de entre 1-2 meses dependiendo el compuesto que esté presente (Holmes & et.al., 2009).

La exposición a concentraciones elevadas de compuestos de mercurio inorgánico puede provocar daño en el tracto gastrointestinal, sistema nervioso y riñones (Diaz-Barriga, 2017). Otros síntomas que se presentan incluyen erupciones en la piel y dermatitis, cambios de humor, pérdida de memoria, alteración mental y debilidad muscular (USEPA, 2014).

Respecto al mercurio orgánico se encuentra el metilmercurio, que puede biomagnificarse en la cadena alimenticia acuática hasta un millón de veces por encima de la concentración en el agua (Lambert, 2012) esta especie es considerada la más tóxica dentro de los compuestos mercuriales y a la que más se tiene exposición. La ingesta de metilmercurio por pez y otros alimentos marinos son la mayor fuente ambiental de toxicidad de mercurio potencial (Solenkova & et al., 2014), donde alrededor del 95% del compuesto es absorbido en el tracto gastrointestinal (Diaz-Barriga, 2017). Los compuestos

orgánicos se evaporan a temperatura ambiente y pueden ingresar al cuerpo si se respiran, mediante esta vía, el 100% de los compuestos de mercurio son absorbidos en los pulmones. Vía dérmica, el metilmercurio difícilmente pasa a la sangre, sin embargo, otros compuestos como el dimetilmercurio, pueden entrar al organismo a través de la piel (Lyn, 2002).

Una vez en el cuerpo, se mueve fácilmente a la mayoría de los tejidos, afectando principalmente el sistema nervioso central particularmente de los fetos y niños pequeños (Choi & et.al, 2008) llegando al cerebro, e incluso puede traspasar la placenta y llegar al cerebro y otros tejidos del bebé, además de transferirse a la leche materna, esto provoca impactos en el desarrollo cognitivo, memoria, atención, lenguaje y habilidades finas espaciales, visuales y motoras del niño (Diaz-Barriga, 2017). Adicionalmente también se pueden presentar síntomas como daño en la visión periférica, alteración de las sensaciones, falta de coordinación de los movimientos, discapacidad para hablar, escuchar o caminar y debilidad muscular (USEPA, 2014). Una porción del metilmercurio es eliminado en la bilis (90%), las heces, el cabello y en la orina (10%) (Lyn, 2002), siendo el tiempo de vida media de eliminación de 45 a 70 días (Artisanal Gold Council, 2014).

2.1.3. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES EN EL AMBIENTE

Los límites máximos permisibles de una sustancia o material están en función de las concentraciones que pueden presentar afectaciones en seres humanos y en el medio ambiente. Existen organizaciones internacionales que establecen límites recomendados, sin embargo, en ocasiones la legislación de cada país modifica estos valores.

En el caso de mercurio, la legislación mexicana establece límites únicamente para la caracterización de residuos peligrosos y para las matrices ambientales de agua y suelo.

En la NOM-001-SEMARNAT-1996 Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, se cuenta con los valores siguientes:

Tabla 2.1 Límites máximos permisibles de mercurio en cuerpos de agua

	Uso	Promedio mensual (mg/l)	Promedio diario (mg/l)
Ríos	Uso en riego agrícola	0.01	0.02
	Uso público urbano	0.005	0.01
	Protección de vida acuática	0.005	0.01
Embalses naturales y artificiales	Uso en riego agrícola	0.01	0.02
	Uso público urbano	0.005	0.01
Aguas costeras	Explotación pesquera, navegación y otros usos	0.01	0.02
	Recreación	0.01	0.02
	Estuarios	0.01	0.02
Suelo	Uso en riego agrícola	0.005	0.01
	Humedales naturales	0.005	0.01

Fuente: recopilación de la NOM-001-SEMARNAT-1996

La NOM-002-SEMARNAT-1996 Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal se cuenta con los valores de 0.01 mg/l promedio mensual, 0.015 mg/l promedio diario y 0.02 mg/l instantáneo.

La NOM-052-SEMARNAT-2005 que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos registra para residuos con mercurio, un valor de LMP (mg/L) igual a 0.2. También clasifica a los lodos de la purificación de salmuera, donde la salmuera purificada separada no se utiliza, en la producción de cloro (proceso de celdas de mercurio), a los lodos del tratamiento de aguas residuales de la producción de monómero de cloruro de vinilo en la que se utilice cloruro de mercurio como catalizador en un proceso base acetileno, como residuos tóxicos crónico (Tt); a los residuos de fenil mercurio y de acetato de mercurio como tóxicos agudos (Th), los residuos de mercurio fulminato como reactivos y tóxicos agudos

(R, Th); residuos de mercurio en todas las formas como tóxico crónico y a los residuos de catalizador gastado de cloruro de mercurio en la producción de cloro, residuos conteniendo mercurio de los procesos electrolíticos y residuos de los hornos de la producción de baterías de mercurio como tóxicos (T).

La NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 Que establece criterios para determinar concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio, establecen concentraciones de referencia totales por tipo de uso de suelo. En el caso del mercurio los límites para un suelo de uso agrícola/residencial/comercial es de 23 mg/kg, mientras que para un suelo de uso industrial es de 310 mg/kg.

En resumen, en la *Tabla 2.2* se presentan los límites máximos permisibles para todas las especies de mercurio en las principales instituciones y organismos nacionales e internacionales:

Tabla 2.2 Límites máximos permisibles de exposición a las diversas especies de mercurio

Especie de mercurio	Límite Máximo Permisible	Matriz ambiental	Organización / Institución	Observaciones
Mercurio inorgánico vapor	0.2, 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Aire	OMS	Inhalación crónica, Exposición promedio anual
Mercurio inorgánico vapor	2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ peso corporal-día		OMS	Ingesta tolerable
MeHg	0.5 mg/kg	Pez	FAO/OMS	Especies no depredadoras
MeHg	1 mg/kg	Pez	FAO/OMS	Especies depredadoras
MeHg	1.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$ peso corporal-semana	Alimentos	FAO/OMS/JECFA	Tolerable para proteger de daños neurotóxicos
Mercurio total	0.07-0.3 mg/kg	Suelo	PUNMA	En suelos orgánicos

Especie de mercurio	Límite Máximo Permissible	Matriz ambiental	Organización / Institución	Observaciones
Mercurio total	23, 310 mg/kg	Suelo	NOM	Uso agrícola, residencial – uso industrial
Mercurio total	1 µg/l	Agua	OMS	-
Mercurio metálico	0.01, 0.015, 0.02 mg/l	Agua	NOM	Vertido a alcantarillado urbano. Promedio mensual, diario e instantáneo.
Mercurio metálico	0.005-0.02 mg/l	Agua	NOM	En aguas residuales, en función del tipo de cuerpo receptor
Mercurio metálico	17-57 mg/kg base seca	Biosólidos	NOM	-
Mercurio metálico	0.2 mg/l	Residuo peligroso	NOM	-
Mercurio metálico	0.1 mg/m ³	Exposición laboral	OSHA	Promedio ponderado 8 h
Mercurio metálico	0.05 mg/m ³	Exposición laboral	NIOSH	Promedio de 10 h
Mercurio metálico	0.025 mg/m ³	Exposición laboral	ACGIH	Promedio de 8 h

Fuente: recopilación del (Bose-O'Reilly, Kathleen, Nadine, & Beate, 2010)

En el caso de daños a la salud humana, se han realizado estudios en diversos sitios identificados en México, contaminados con mercurio, los cuales han dado como resultado, valores de concentración de mercurio en trabajadores y población local por encima de los límites máximos permisibles. En la tabla 2.3 se muestran los casos identificados para la minería.

Tabla 2.3 Casos de estudio de población afectada en sitios contaminados

Nombre del sitio	Ubicación	Fuente original de mercurio	Breve descripción	Referencias
Camargo	Sierra Gorda, Querétaro	Minería primaria de mercurio	100% de los mineros con valores urinarios de mercurio por arriba de la guía ocupacional (23 ppm).	UASLP
Nuevo Mercurio	San Felipe Nuevo Mercurio, Zacatecas	Jales de mercurio y minería artesanal	11 de 35 niños presentaron niveles superiores en orina a la referencia de 5 ng/ml, el mayor 32.2 ng/ml	UASLP

Fuente: (Díaz-Barriga, 2017)

2.1.4. EL DESASTRE DE MINAMATA

El Ministerio del Medio Ambiente de Japón publicó una relatoría sobre los acontecimientos en Minamata en la década de los 50's, así como sus principales consecuencias, la cual se menciona a continuación:

“En abril de 1956, una joven habitante del Distrito de Tsukinoura de la Ciudad de Minamata, fue internada en el hospital de la planta de Chisso, quejándose de un severo adormecimiento de sus extremidades e incapacidad para comer y hablar”.

“En el distrito se comenzó a observar un número creciente de personas que padecen de entumecimiento o temblor en las extremidades, la reducción del campo visual, dificultad para oír y ataxia, una disminución de la capacidad de coordinar los movimientos, manifestándose como temblor de partes del cuerpo durante la realización de movimientos voluntarios, (Federación de Ataxias de España, s.f.). Algunos se quedaron en cama o mostraban síntomas más graves, como la pérdida de conciencia y otros casos resultaron en la muerte del paciente”.

“Debido a la sospecha de que los causantes de la enfermedad fueran los pescados y mariscos capturados en la Bahía de Minamata, la Cooperativa de Pescadores de Minamata se abstuvo de pescar en dicha bahía bajo la guía administrativa del Gobierno Prefectoral de Kumamoto en agosto de 1957. A esas alturas, el Gobierno Prefectoral de Kumamoto ya había optado por una política de prohibición total de la pesca en la Bahía de Minamata con la aplicación de la Ley de Sanidad Alimentaria y, en agosto 1957, le solicitó al MSB la decisión final con respecto a la legalidad de dicha medida. La respuesta del MSB fue que dicha medida no podría hacerse cumplir legalmente ya que no existían evidencias claras de contaminación tóxica de peces y mariscos en algún área específica de la Bahía de Minamata. En consecuencia, mantuvieron la restricción de la pesca voluntaria de la Cooperativa de Pescadores de Minamata ampliando las áreas de prohibición”.

“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 el 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”.

“En Julio de 1959, el Equipo de Investigación de la Enfermedad de Minamata de la Facultad de Medicina de la Universidad de Kumamoto informó que habían llegado a la conclusión de que la substancia causante de la Enfermedad de Minamata era un compuesto de mercurio, probablemente un compuesto de organomercurio. El 11 de noviembre de 1959, un investigador de la Universidad de Kumamoto anunció que existía la sospecha de envenenamiento por organomercurio causado por el efluente de la planta. Algunos participantes señalaron que no existían reportes de enfermedades parecidas conectadas a los efluentes de otras plantas químicas similares y que el proceso de transformación desde mercurio inorgánico a mercurio orgánico no se había establecido con suficiente claridad. El Consejo de Investigación de Salubridad Alimentaria, luego de reunirse al día siguiente, entregó su veredicto al Ministerio de Salud y Bienestar el cual indicaba que el causante principal de la Enfermedad de Minamata se trataba, con toda probabilidad, de algún compuesto de organomercurio sin mencionar el origen de dicha contaminación”.

“El 26 de Septiembre de 1968, el MSB y la Agencia de Ciencia y Tecnología anunciaron la opinión concertada del gobierno de que la Enfermedad de Minamata en la Prefectura de Kumamoto se debía a “compuestos de metilmercurio generados por instalaciones para la fabricación de acetaldehído y ácido acético” de la planta de Chisso en Minamata y que la misma enfermedad observada en Niigata era causada por “compuestos de metilmercurio generados como subproducto del proceso de manufactura de acetaldehído” de la planta local de Showa Denko”.

“Chisso detuvo la manufactura de acetaldehído, el elemento causante de la Enfermedad de Minamata en mayo de 1968, 12 años después del reconocimiento oficial de la enfermedad. Se estima que la cantidad de mercurio y compuestos de metilmercurio vertidos durante ese período se situaría entre 80 y 150 Mg, y como resultado nuevas víctimas fueron identificadas”.

“La Enfermedad de Minamata es un desorden neurotóxico causado por la ingesta de productos marinos contaminados con compuestos de metil mercurio vertidos desde la planta de Minamata (Prefectura de Kumamoto) de la Shin-Noppon Chisso Hiryo K.K. o la planta de Showa Denko K.K. en Kanose Town, Prefectura de Niigata”.

“Sus síntomas principales incluyen trastornos sensoriales, ataxia, contracción concéntrica del campo visual y desordenes auditivos. Si una madre es expuesta a altos niveles de metilmercurio durante el embarazo, su bebé puede sufrir de la Enfermedad de Minamata fetal y podrá mostrar síntomas diferentes a la versión adulta de la condición”.

“La enfermedad de Minamata, es la consecuencia directa de la contaminación de efluentes con

compuestos de metilmercurio provenientes de plantas químicas. La extensión y severidad de los daños tanto a la salud humana como al medio ambiente causados por este tipo de contaminación no tiene precedentes en la historia humana y ha dejado unos problemas serios a la sociedad local a largo plazo”.

(Ministerio del Medio Ambiente de Japón, 2013).

Los daños se calculan en un estimado de 12,631 millones de yen por año, equivalentes a aproximadamente 2 mil millones de pesos mexicanos, este costo fue asumido por la empresa Chisso Co. Ltd. Invirtiendo en medidas preventivas y control de contaminación. 7,671 millones de yen/año se destinan para pago de indemnizaciones, 4,271 millones de yen/año en dragado de la Bahía de Minamata y 689 millones de yen/año como indemnización a la industria pesquera (Grupo de Estudio para el Medio Ambiente Global y la Economía, 1991).

2.1.5. EL INVENTARIO NACIONAL DE EMISIONES Y LIBERACIONES DE MERCURIO EN MÉXICO (INELM).

La metodología aplicada para la obtención del Inventario Nacional de Emisiones y Liberaciones de Mercurio proviene del PNUMA: metodología nivel 2 del “Toolkit for Identification and Quantification of Mercury Releases” Versión 1.2 2015. Por lo que el año base de estudio del inventario fue el 2015. Esta metodología considera 11 categorías en las cuales se puede presentar contaminación con mercurio (PNUMA, 2015):

1. Extracción y uso de combustibles/fuentes de energía;
2. Producción primaria de metales;
3. Producción de otros minerales y materiales con impurezas de mercurio;
4. Uso deliberado de mercurio en procesos industriales;
5. Productos de consumo deliberado de mercurio;
6. Otros usos deliberados en productos/procesos;
7. Producción de metales reciclados (producción secundaria de metales);
8. Incineración de residuos;
9. Disposición de residuos/ rellenos sanitarios y tratamiento de aguas residuales;
10. Crematorios y cementerios; y
11. Identificación de sitios contaminados.

El cálculo de emisiones y liberaciones aplicado en cada categoría utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Liberación estimada de mercurio a la vía X} = \text{Tasa de actividad} * \text{Factor de entrada} * \text{Factor de distribución de emisiones para la vía X}$$

Ecuación 2.1 Cálculo de emisiones y liberaciones de mercurio

En donde:

La “Liberación estimada de mercurio a la vía X”, es la cantidad estimada de mercurio liberada al ambiente por unidad de tiempo [Mg Hg/año]; esto es, el cálculo que se necesita determinar para cada categoría por cada país que firme el Convenio.

La “Tasa de actividad”, es la cantidad de materia prima procesada o productos manufacturados por unidad de tiempo [Mg/año o pieza/año]; esta información se recopiló de fuentes oficiales como cámaras industriales, empresas relacionadas con la actividad u organismos gubernamentales.

El “Factor de entrada” varía dependiendo la categoría a analizar, en el caso de la minería primaria es el contenido de mercurio por unidad de materia prima procesada [kg Hg/Mg de metal producida]; estos datos son proporcionados por la guía instrumental del PNUMA, con diversos estudios realizados, algunos factores se actualizaron con análisis de campo en específico para México.

Los “Factores de distribución de las emisiones” se refieren a la fracción de la entrada de mercurio que se libera a través de una vía en particular como son: aire, agua, suelo, productos, residuos generales o tratamiento específico de residuos de cada sector; la suma de los factores de distribución debe ser igual a 1, sin embargo, en algunas fuentes no se ha identificado la “partición” del mercurio en todas las matrices analizadas.

$$\sum Y_i = Y_{aire} + Y_{agua} + Y_{suelo} + Y_{producto} + Y_{residuo} + Y_{trat.esp.} = 1$$

Ecuación 2.2 Suma de factores de distribución

Los resultados de este inventario determinaron que las categorías con mayor impacto en contaminación ambiental con mercurio son:

1. Minería primaria – 874.9 Mg/año;
2. Disposición de residuos – 206.2 Mg/año, y
3. Productos con uso intencional de mercurio – 27.5 Mg/año.

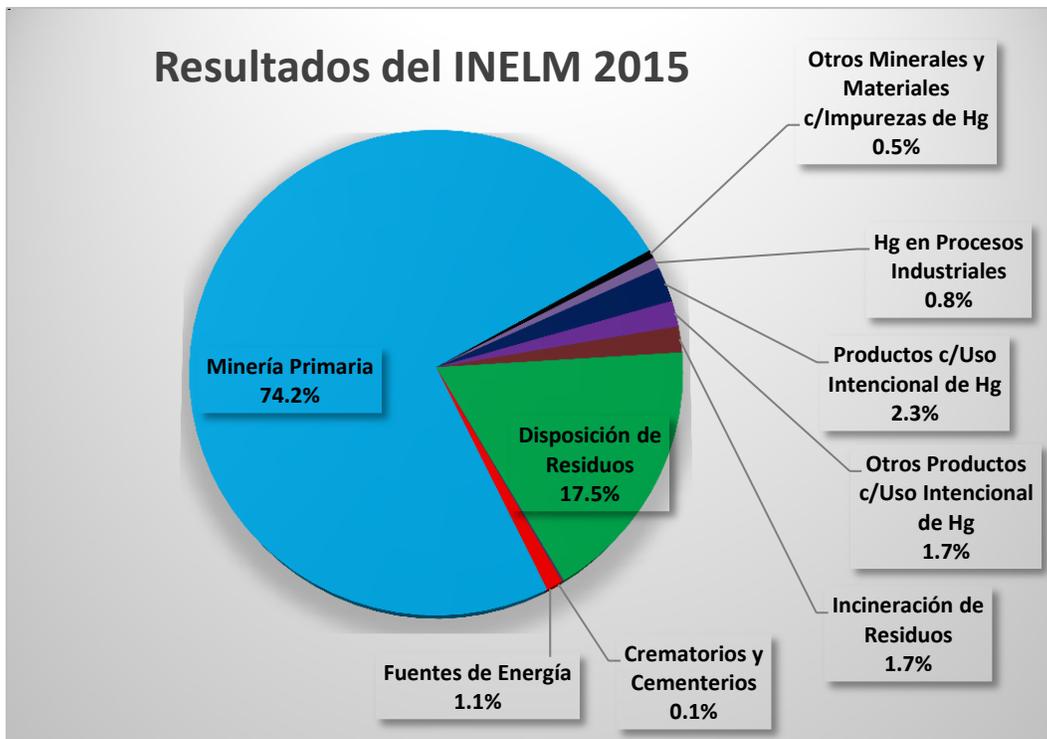


Figura 2.2 Resultados del INELM, 2015. Fuente: Elaboración propia con datos del INECC

En la categoría de “Minería primaria” se engloban las siguientes subcategorías, donde la extracción primaria y procesamiento de mercurio es la principal emisora de mercurio al ambiente como se muestra en la Figura 2.3:

- a. Extracción primaria y procesamiento de mercurio;
- b. Extracción de oro y plata con proceso de amalgamación de mercurio;
- c. Extracción y procesamiento inicial de zinc;
- d. Extracción y procesamiento inicial de cobre;
- e. Extracción y procesamiento inicial de plomo;
- f. Extracción y procesamiento inicial de oro por otros procesos diferentes a la amalgamación;
- g. Extracción y procesamiento inicial de aluminio;
- h. Extracción y procesamiento de otros metales no ferrosos y;
- i. Producción primaria de metales ferrosos.

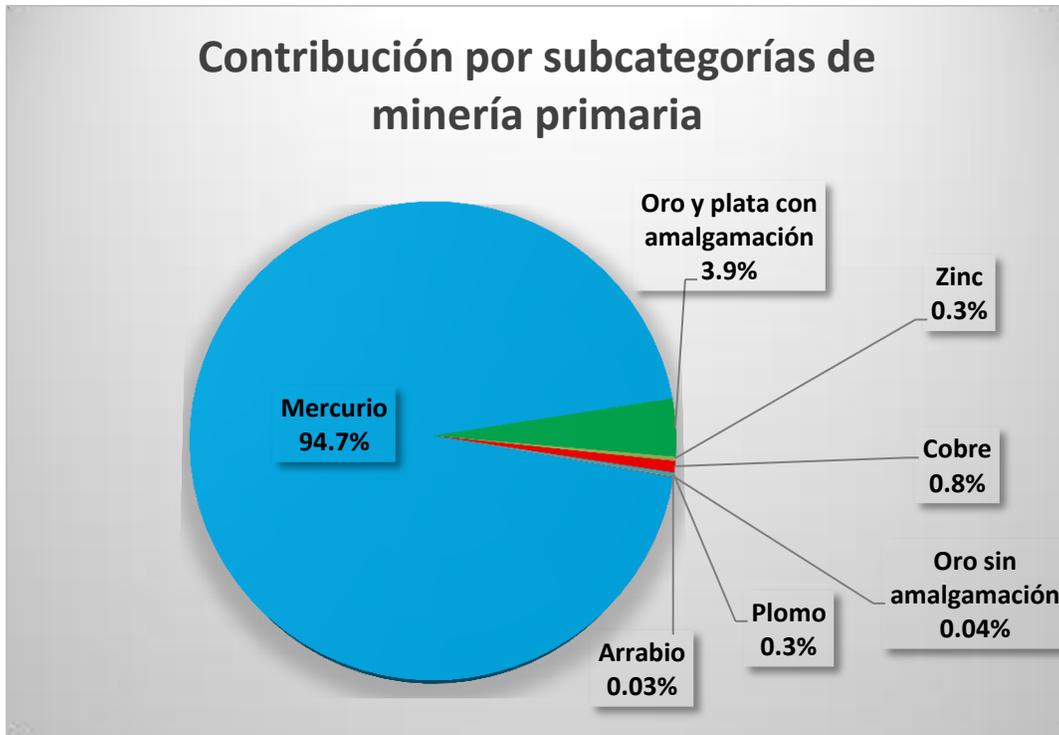


Figura 2.3 Contribución de contaminación con mercurio por subcategoría. Fuente: Elaboración propia con datos del INECC

La metodología de PNUMA considera los efectos adversos a la atmósfera, al suelo y a los ambientes acuáticos que genera la minería primaria de mercurio, es por eso por lo que asigna factores de distribución a cada matriz mencionada.

La estimación de emisiones y liberaciones de mercurio para extracción primaria y procesamiento de mercurio se realizó con los datos siguientes:

-Tasa de actividad [Mg Hg producido / año] = 804.6

-Factor de entrada [kg Hg/Mg Hg producido] = 1,020-1,040 (1,030 recomendado por UN).

-Factores de distribución: Aire = 0.00728; Agua = 0.0017; Suelo = 0.0201; Producto = No Disponible; Residuos = No Disponible; Disposición/Tratamiento sector específico = No Disponible.

Aplicando la ecuación 2.1 se tienen las siguientes emisiones y liberaciones:

Tabla 2.4 Emisiones y liberaciones de mercurio por matriz ambiental afectada

Liberación estimada de mercurio a la vía X	= Tasa de actividad * Factor de entrada * Factor de distribución de emisiones para la vía X
Emisión estimada de mercurio al aire	= 804.6 Mg Hg producido/año * 1,030 kg Hg/ Mg Hg producido * 0.00728 = 6,034.50 kg Hg/año.
Liberación estimada de mercurio al agua	= 804.6 Mg Hg producido/año * 1,030 kg Hg/ Mg Hg producido * 0.0017 = 1,444.28 kg Hg/año.
Liberación estimada de mercurio al suelo	= 804.6 Mg Hg producido/año * 1,030 kg Hg/ Mg Hg producido * 0.0201 = 16,655.22 kg Hg/año.

Fuente: elaboración propia con datos del INECC.

La contaminación por mercurio estimada por los factores de entrada y distribución de Naciones Unidas muestra valores elevados que afectan a la población local, nacional y mundial, y es aquí donde radica la importancia de determinar un factor de entrada propio de México para actualizar los números del inventario y conocer la contribución real de contaminación con mercurio por su principal fuente: “Extracción primaria y procesamiento de mercurio”.

2.1.6. MINERÍA PRIMARIA Y PRODUCCIÓN DE MERCURIO EN MÉXICO.

En la época prehispánica, el mercurio se utilizaba como mercurio inorgánico (cinabrio), se empleaba como colorante y para el entierro de nobles. El cinabrio se obtenía entonces, de la zona minera de Querétaro (Instituto Nacional de Antropología e Historia, 2016). En la época colonial de 1556 a 1710, se importaron 20 giga gramos de mercurio, lo cual equivale a casi cinco años de la producción mundial actual (Castro, 2011).

En la época moderna, México ha realizado exportaciones que equivalen al 41% de las ganancias mundiales por este concepto (Statista, 2018). El crecimiento de México fue del 55% entre 2007 y 2015, fue el segundo país (solamente detrás de Indonesia) con el mayor crecimiento en la exportación del metal (Statista, 2018).

En la naturaleza, el mercurio se presenta principalmente como un mineral de sulfuro de mercurio, comúnmente llamado “Cinabrio”. La formación de los minerales en los depósitos de mercurio ocurre en el intervalo de temperaturas de 350 a 50°C y una presión de 1,500 hasta 300-400 kgf/cm² (SGM, 2017).

Los depósitos de mercurio son formaciones hidrotermales y pertenecen a los yacimientos de tipo epitermal de baja e intermedia sulfuración (Figura 2.4) relacionados con rocas intrusivas de profundidad baja a intermedia. En la mayoría de los yacimientos de mercurio de la zona centro de México, existe una asociación con fallas y fracturas regionales. Por lo general, las minas de mercurio están dentro de calizas brechadas y silicificadas (Morales-Ávila, 2008).

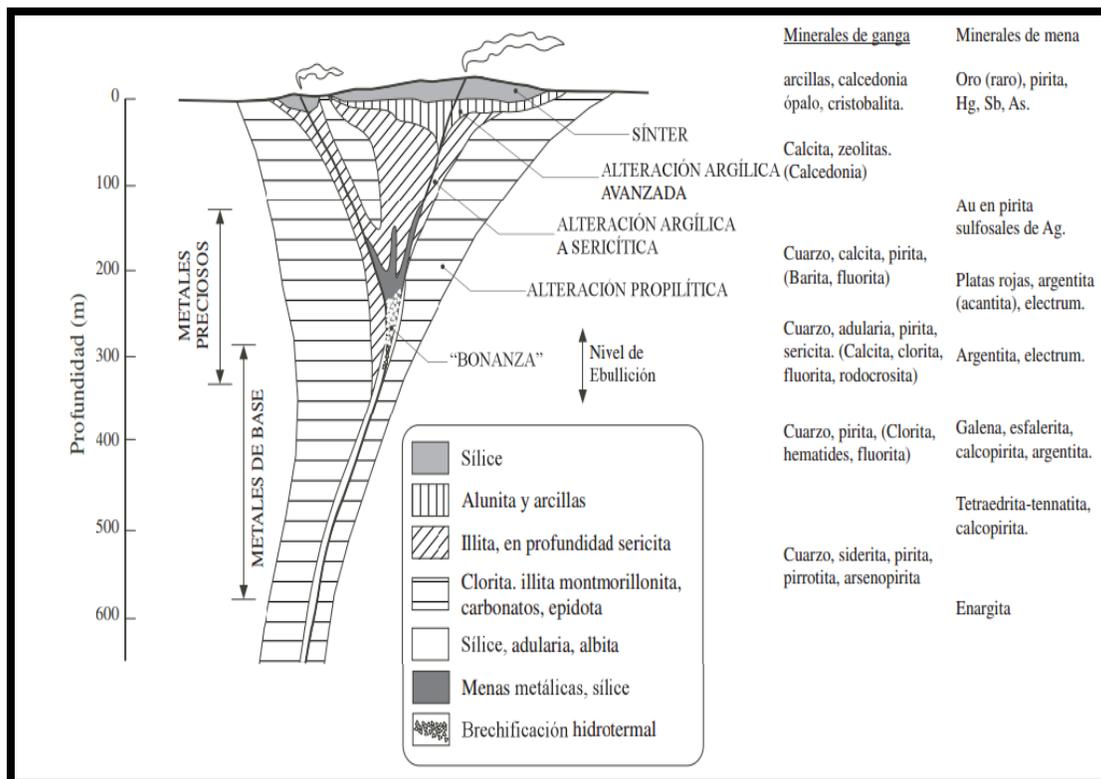


Figura 2.4 Modelo estructural general de los depósitos epitermales alcalinos (baja e intermedia sulfuración), indicando la mineralogía de ganga, los patrones de alteración típicos, la variación en la mineralogía de mena típica en profundidad y en la morfología de la mineralización.

Fuente SGM, Modificado de Camprubi.

La principal región productora de mercurio en México se localiza en la Sierra Gorda de Querétaro, en la región central de la Sierra Madre Oriental (SGM, 2017), en donde afloran rocas sedimentarias del Cretácico medio-tardío, identificadas como las formaciones Trancas, El Doctor, Tamaulipas y Soyatal-Mexcala (Levresse, et.al., 2008).

La explotación del mercurio se ha convertido para muchas familias de la Sierra Gorda queretana en la única opción para lograr un ingreso económico (SGM, 2017). El mercurio representa alrededor del 30% de la actividad minera del estado de Querétaro (Flores, 2014). En la Sierra Gorda existe un número indeterminado de pequeñas obras mineras por mercurio, la mayoría de ellas actualmente abandonadas, de las cuales, las que aún laboran, trabajan en la informalidad (Flores, 2014).

En la Sierra Gorda queretana los yacimientos de mercurio se alojan frecuentemente en estratos de caliza de la formación El Doctor, facies La Negra o cerca de sus contactos, en forma de vetas controladas por fallas (SGM, 2017). Las vetas son en general de 5 cm a 2 m de espesor y presentan rumbos diversos e inclinaciones casi verticales (SGM, 2017).

Además de la Sierra Gorda, existen otros depósitos de menor importancia en los estados de Durango, San Luis Potosí, Jalisco, Zacatecas y Guerrero (INECC,2017) como se muestra en la *Figura 2.5*.

Hasta el mes de mayo de 2017, se tenía el registro de 25,515 concesiones mineras de todos los elementos (SGM, 2017), de las cuales 48 estaban registradas para explotación primaria de mercurio y 339 involucran a este metal como elemento secundario. Esto representa un área de explotación de 2,004 hectáreas (SGM, 2017). Los estados con mayor número de concesiones de minería de mercurio son Querétaro con 36 como elemento principal y 118 como elemento secundario, Durango con 4 concesiones como elemento principal y 44 como elemento secundario y Zacatecas con 64 permisos como elemento secundario (SGM, 2017).

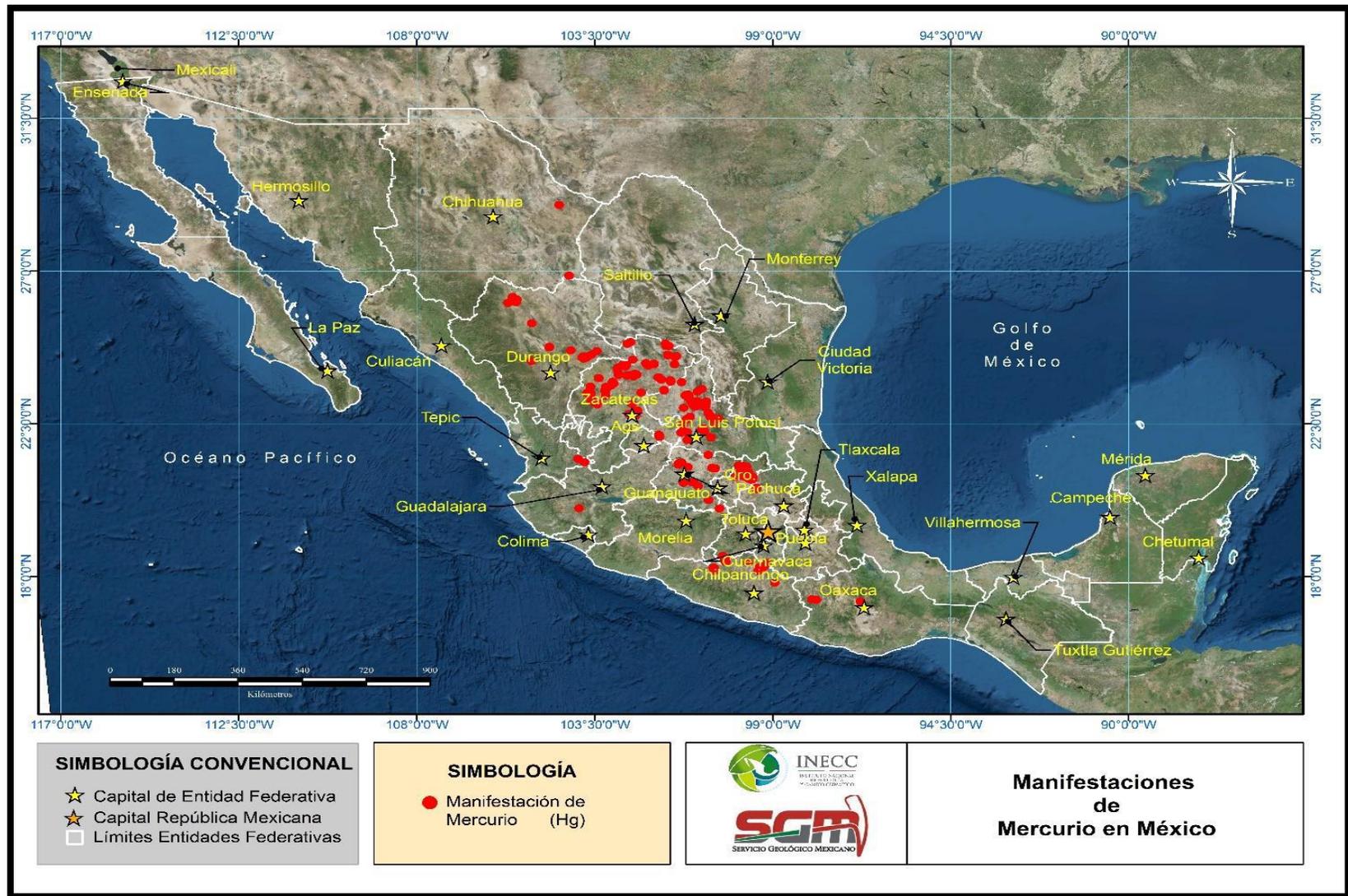


Figura 2.5 Localización de los depósitos y manifestaciones de mercurio a nivel nacional. Fuente: SGM, 2017

La distribución de mercurio en mercurio en las diversas matrices que analiza el PNUMA por tipo de metal extraído se reportan en la *Tabla 2.5*

Tabla 2.5 Distribución de mercurio presente en la extracción de minerales

Mineral Extraído	Fracción emitida al aire	Fracción liberada al agua	Fracción liberada al suelo	Fracción liberada en producto	Fracción liberada en residuo	Fracción liberada en tratamiento/ disposición específica del sector
Producción de mercurio del mineral	0.25	0.06	0.69	-	-	-
Oro por amalgamación	0.75	0.13	0.12	-	-	-
Extracción y procesamiento de zinc	0.1	0.02	-	0.42	-	0.46
Extracción y procesamiento de cobre	0.1	0.02	-	0.42	-	0.46
Extracción y procesamiento de plomo (sistema de lavado de gases)	0.49	0.02	-	-	-	0.49
Extracción y procesamiento de plomo (sistema de lavado de gases y planta de ácido)	0.1	0.02	-	-	0.42	0.46
Extracción de oro y procesamiento inicial por otros procesos diferentes a la amalgamación	0.04	0.02	0.9	0.04	-	-
Producción primaria de metales ferrosos	0.95	-	-	-	-	0.05

Fuente: (PNUMA, 2015)

2.2 LEGISLACIÓN NACIONAL E INTERNACIONAL

2.2.1 LEGISLACIÓN NACIONAL

La jerarquía del orden jurídico mexicano respeta el siguiente orden:

1. La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos;
2. Las leyes federales, ordinarias, reglamentarias y municipales y los convenios internacionales;
3. Reglamentos;
4. Normas jurídicas individualizadas.

En el caso de los Convenios internacionales, es tema de discusión si estos se encuentran por encima de la Constitución Federal, al mismo nivel o al nivel de las leyes, debido a que el derecho internacional no pasa por ningún proceso propiamente legislativo como el requerido para las leyes nacionales porque no hay un órgano legislativo internacional similar al existente en los Estados (Otero, 2009).

CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS (CPEUM)

La actividad minera se regula de acuerdo con el Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que establece: “La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originariamente a la Nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada.” (Párrafo I del artículo 27 de la CPEUM, Reformado en el Diario Oficial de la Federación el 10 de enero de 1934).

La nación tendrá en todo tiempo el derecho de imponer a la propiedad privada las modalidades que dicte el interés público, así como el de regular, en beneficio social, el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación, con objeto de hacer una distribución equitativa de la riqueza pública, cuidar de su conservación, lograr el desarrollo equilibrado del país y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural y urbana. En consecuencia, se dictarán las medidas necesarias para ordenar los asentamientos humanos y establecer adecuadas provisiones, usos, reservas y

destinos de tierras, aguas y bosques, a efecto de ejecutar obras públicas y de planear y regular la fundación, conservación, mejoramiento y crecimiento de los centros de población; para preservar y restaurar el equilibrio ecológico... y para evitar la destrucción de los elementos naturales y los daños que la propiedad pueda sufrir en perjuicio de la sociedad (Fragmento del párrafo 3 del artículo 27 de la CPEUM, Reformado en el Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de 1992).

Corresponde a la Nación el dominio directo de todos los recursos naturales de la plataforma continental y los zócalos submarinos de las islas; de todos los minerales o sustancias que en vetas, mantos, masas o yacimientos, constituyan depósitos cuya naturaleza sea distinta de los componentes de los terrenos, tales como los minerales de los que se extraigan metales y metaloides utilizados en la industria; los yacimientos de piedras preciosas, de sal de gema y las salinas formadas directamente por las aguas marinas; los productos derivados de la descomposición de rocas, cuando su explotación necesite trabajos subterráneos; los yacimientos minerales u orgánicos de materias susceptibles de ser utilizadas como fertilizantes; los combustibles minerales sólidos; el petróleo y todos los carburos de hidrógenos sólidos, líquidos o gaseosos; y el espacio situado sobre el territorio nacional, en la extensión y términos que fije el Derecho Internacional (Párrafo IV del artículo 27 de la CPEUM, Reformado en el Diario Oficial de la Federación el 20 de enero de 1960).

El dominio de la Nación es inalienable e imprescriptible y la explotación, el uso o el aprovechamiento de los recursos de que se trata, por los particulares o por sociedades constituidas conforme a las leyes mexicanas, no podrá realizarse sino mediante concesiones, otorgadas por el Ejecutivo Federal, de acuerdo con las reglas y condiciones que establezcan las leyes... Las normas legales relativas a obras o trabajos de explotación de los minerales y sustancias a que se refiere el párrafo cuarto regularán la ejecución y comprobación de los que se efectúen o deban efectuarse a partir de su vigencia, independientemente de la fecha de otorgamiento de las concesiones y su inobservancia dará lugar a la cancelación de estas... (Fragmento del párrafo VI del artículo 27 de la CPEUM, Reformado en el Diario Oficial de la Federación el 20 de diciembre de 2013).

LEY MINERA Y REGLAMENTO MINERO

La estructura organizacional del Sector Minero Gubernamental está encabezada por la Secretaría de Economía (SE) por medio de la Coordinación General de Minería, de la cual, se derivan cinco organismos más: el Servicio Geológico Mexicano (SGM), la Dirección General de Regulación Minera (DGRM), la Dirección General de Desarrollo Minero (DGDM), el Fideicomiso de Fomento Minero (FIFOMI) y la Exportadora de Sal (ES). Su misión es: “Fomentar la productividad y competitividad de la economía mexicana mediante una innovadora política de fomento industrial, comercial y de servicios, así como el impulso a los emprendedores y las empresas de los sectores social y privado, fincado en la mejora regulatoria, la competencia de mercado y la diversificación de comercio exterior, para lograr el bienestar de los consumidores, un mejor ambiente de negocios, fortalecer el mercado interno y la atracción de inversión nacional y extranjera, que mejore las condiciones de vida de los mexicanos” (Dirección General de Desarrollo Minero, 2013).

La regulación de la actividad minera está a cargo principalmente de 7 Dependencias (Dirección General de Desarrollo Minero, 2013):

1. Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP): Controla los impuestos;
2. Secretaría de Trabajo y Previsión Social (STPS): Controla la regulación laboral;
3. Secretaría de Salud-Instituto Mexicano del Seguro Social: Controla la seguridad social y servicios;
4. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT): Maneja la regulación ambiental;
5. Secretaría de Defensa Nacional (SEDENA): Verifica la regulación del uso de explosivos;
6. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU): Regula la tenencia de la tierra, y
7. Secretaría de Economía (SE): Controla la regulación, promoción de la actividad minera y la constitución de empresas.

Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 26 de junio de 1992 y con última reforma publicada el 11 de agosto de 2014, la Ley Minera se compone de 7 capítulos y 59 artículos.

El Capítulo primero sobre “Disposiciones Generales” menciona en el Artículo 4: “Son minerales o sustancias que en vetas, mantos, masas o yacimientos constituyen depósitos distintos de los componentes de los terrenos los siguientes:

I. Minerales o sustancias de los que se extraigan antimonio, arsénico, bario, berilio, bismuto, boro, bromo, cadmio, cesio, cobalto, cobre, cromo, escandio, estaño, estroncio, flúor, fósforo, galio, germanio, hafnio, hierro, indio, iridio, itrio, lantánidos, litio, magnesio, manganeso, mercurio, molibdeno, niobio, níquel, oro, osmio, paladio, plata, platino, plomo, potasio, renio, rodio, rubidio, rutenio, selenio, sodio, talio, tantalio, telurio, titanio, tungsteno, vanadio, zinc, zirconio y yodo. (Minera, 2014).

El Artículo 15 de la Ley Minera establece: “Las concesiones mineras tendrán una duración de cincuenta años, contados a partir de la fecha de su inscripción en el Registro Público de Minería y se prorrogarán por igual término si sus titulares no incurrieron en las causales de cancelación previstas en la presente Ley y lo solicitan dentro de los cinco años previos al término de su vigencia” (Párrafo reformado en el Diario Oficial de la Federación el 28 de abril de 2005).

En el Artículo 16 se hace referencia a las asignaciones mineras, donde se menciona que: “Las asignaciones mineras conferirán derechos sobre todos los minerales o sustancias sujetos a la aplicación de esta Ley y tendrán una duración improrrogable de seis años, contados a partir de la fecha de publicación del título respectivo en el Diario Oficial de la Federación” (Minera, 2014).

El Capítulo Cuarto de los Artículos 27 al 38 donde se mencionan “De las Obligaciones que Imponen las Concesiones y Asignaciones Mineras y el Beneficio de Minerales” entre las cuales destacamos la fracción VII “Rendir a la Secretaría los informes estadísticos, técnicos y contables en los términos y condiciones que señale el Reglamento de la presente Ley (Fracción reformada en el Diario Oficial de la Federación el 26 de junio de 2006); y la fracción X “Rendir al Servicio Geológico Mexicano, en el caso de concesiones otorgadas

mediante concurso, un informe semestral en los meses de enero y julio de cada año, de los trabajos realizados y de la producción obtenida en el lote amparado por la concesión minera, para efectos de control del pago de la prima por descubrimiento o cualquier otra contraprestación económica contemplada a favor de dicho organismo” (Fracción adicionada al Diario Oficial de la Federación el 28 de abril de 2005 y reformada el 26 de junio de 2006).

Referente al “Reglamento de la Ley Minera”, este tiene por objeto “Regular el otorgamiento y administración de las concesiones mineras, y la forma en que se ejercerán y cumplirán los derechos y obligaciones que de este deriven (Reglamento de la Ley Minera, 2012).

Existen otros instrumentos legales a nivel “Leyes” relacionados con la minería como la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) que en su artículo 5º, fracción XIV que son facultades de la Federación “La regulación de las actividades relacionadas con la exploración, explotación y beneficio de los minerales, sustancias y demás recursos del subsuelo que corresponden a la nación, en lo relativo a los efectos que dichas actividades puedan generar sobre el equilibrio ecológico y el ambiente (Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, 1988), la Ley de Inversión Extranjera cuyo objeto es la determinación de reglas para canalizar la inversión extranjera hacia el país y propiciar que ésta contribuya al desarrollo nacional (Ley de Inversión Extranjera, 1993) y el Reglamento de la Ley de Inversión Extranjera y del Registro Nacional de Inversiones Extranjeras.

NORMAS MEXICANAS

En México la normalización se plasma en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de carácter obligatorio, elaboradas por Dependencias del Gobierno Federal y las Normas Mexicanas (NMX) de ámbito primordialmente voluntario, promovidas por la Secretaría de Economía y el sector privado a través de los Organismos Nacionales de Normalización (Secretaría de Economía, 2016). En la

Tabla 2.6 se muestran las normas de carácter oficial en materia de minería y de protección ambiental, así como de seguridad laboral relacionadas con la minería y sus residuos generados.

Tabla 2.6 Normas Mexicanas relacionadas con la minería y emisiones de mercurio

NORMA	DESCRIPCIÓN
NOM-023-STPS-2012	Minas subterráneas y minas a cielo abierto. --Condiciones de seguridad y salud en el trabajo
NOM-127-SSA1-1994	Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
NMX AA-132-SCFI-2016	Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra.
NOM-052-SEMARNAT-2005	Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos
NOM-098-SEMARNAT-2002	Protección ambiental-incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes.
NOM-120-SEMARNAT-2011	Que establece las especificaciones de protección ambiental para las actividades de exploración minera directa, en zonas agrícolas, ganaderas o eriales y en zonas con climas secos y templados en donde se desarrolle vegetación de matorral xerófilo, bosque tropical caducifolio, bosques de coníferas o encinos
NOM-141-SEMARNAT-2003	Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post operación de presas de jales
NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	Que establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, selenio, talio y/o vanadio.
NOM-157-SEMARNAT-2009	Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros.

Fuente: Recopilación de Normatividad mexicana elaboración propia.

2.2.2 EL CONVENIO DE MINAMATA

En 2001, el Consejo de Administración del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente invitó al Director Ejecutivo del PNUMA a emprender una evaluación del mercurio y de sus compuestos a nivel mundial, en la cual debería figurar información sobre las características químicas y las consecuencias en la salud, las fuentes, el transporte a larga distancia y las tecnologías de prevención y control referidas al mercurio. En 2003, el Consejo de Administración examinó dicha evaluación y decidió que existían pruebas suficientes de las repercusiones nocivas a nivel mundial del mercurio y sus compuestos que justificaban que se continuasen adoptando medidas a nivel internacional para disminuir los riesgos para la salud humana y el medio ambiente derivados de la liberación de mercurio y sus compuestos en el medio ambiente. Se alentó a los gobiernos a que fijaran objetivos con el fin de reducir las emisiones y liberaciones de mercurio, y el PNUMA puso en marcha actividades de asistencia técnica y de fomento de la capacidad para cumplir dichos objetivos (PNUMA, 2017).

En enero de 2013, en su quinto periodo de sesiones, el Comité Intergubernamental de Negociación acordó el texto del Convenio de Minamata sobre el Mercurio. El texto fue adoptado en la Conferencia de Plenipotenciarios reunida en el Japón, el 10 de octubre de 2013, tras lo cual fue abierto a la firma durante un año (PNUMA, 2017).

El Convenio tiene por objeto proteger la salud humana y el medio ambiente de las emisiones y liberaciones antropogénicas de mercurio y compuestos de mercurio, y en él se recogen diversas medidas para cumplir dicho objetivo (PNUMA, 2017).

El Convenio está compuesto de 35 artículos y 5 anexos en los cuales describen las medidas de control del suministro y comercio del mercurio con cuyo fin se imponen limitaciones a determinadas fuentes de mercurio como la extracción primaria del mineral. En virtud de otras medidas, se controlan los productos con mercurio añadido y los procesos de fabricación en los que se utiliza mercurio o compuestos de mercurio y se fiscaliza también la extracción de oro artesanal y en pequeña escala. Las emisiones y liberaciones de mercurio son recogidas cada una en artículo aparte, y se busca reducir los niveles de mercurio, pero de manera flexible y teniendo presentes los planes de desarrollo del país.

Hay igualmente medidas que tienen por objeto el almacenamiento provisional ambientalmente racional del mercurio, así como los residuos de mercurio y los sitios contaminados. En el texto se provee apoyo financiero técnico a los países en desarrollo y los países con economías en transición, además se define un mecanismo financiero para proporcionar adecuados, predecibles y oportunos recursos financieros (PNUMA, 2017).

En el Convenio de Minamata se estipula que el Convenio entrará en vigor el nonagésimo día contando a partir de la fecha en que haya sido depositado el quincuagésimo instrumento de ratificación, aceptación, aprobación o adhesión. El cumplimiento de esa condición se alcanzó el 18 de mayo de 2017, lo que hizo posible la entrada en vigor del Convenio el 16 de agosto de 2017 y la convocación de la primera reunión de su Conferencia de las Partes del 24 al 29 de septiembre de 2017 en Ginebra (PNUMA, 2017).

Para la Evaluación Inicial del Convenio de Minamata (MIA por sus siglas en inglés) se han establecido medidas políticas y regulatorias para las disposiciones relevantes en México (Díaz-Barriga, 2017). En la Tabla 2.7 se mencionan las obligaciones que se adquieren con el Convenio de Minamata, en función de que artículo del documento se basa, todo *esto únicamente relativo a la minería primaria y su relación con el presente proyecto*.

Tabla 2.7 Relevancia política, regulatoria e institucional del proyecto, para cumplir con el Convenio de Minamata

Artículo del Convenio de Minamata	Aplicación al proyecto.
<p><i>Artículo 3 “Fuentes de suministro y comercio de mercurio”, párrafo 5:</i></p> <p>“Cada Parte:</p> <p>a) Se esforzará por identificar cada una de las existencias de mercurio o compuestos de mercurio superiores a 50 Mg, así como las fuentes de suministro de mercurio que generen existencias superiores a 10 Mg por año, que estén situadas en su territorio”</p>	<p>El proyecto se realizará en zonas identificadas con producción mayor a 10 Mg.</p>
<p><i>Artículo 8 “Emisiones”, párrafo 1:</i></p> <p>El presente artículo trata del control y, cuando sea viable, la</p>	<p>Se debe conocer el panorama actual para plantear indicadores</p>

Artículo del Convenio de Minamata	Aplicación al proyecto.
<p>reducción de las emisiones de mercurio y compuestos de mercurio, a menudo expresadas como “mercurio total”, a la atmósfera mediante medidas encaminadas a controlar las emisiones procedentes de las fuentes puntuales que entran dentro de las categorías enumeradas en el anexo D.</p>	<p>ambientales en control de calidad del aire.</p>
<p><i>Artículo 8 “Emisiones”, párrafo 3:</i></p> <p>Una Parte en la que haya fuentes pertinentes adoptará medidas para controlar las emisiones y podrá preparar un plan nacional en el que se expongan las medidas que deben adoptarse para controlar las emisiones, así como las metas, los objetivos y los resultados que prevé obtener. Esos planes se presentarán a la Conferencia de las Partes en un plazo de cuatro años desde la fecha de entrada en vigor del Convenio para esa Parte. Si una Parte decidiera elaborar un plan de aplicación con arreglo a lo establecido en el artículo 20, podrá incluir en su texto el plan que se contempla en el presente párrafo.</p>	<p>Conocidos los resultados del panorama actual se pueden establecer directrices en el plan nacional que se presentará a la Conferencia de las Partes en 2021.</p>
<p><i>Artículo 8 “Emisiones”, párrafo 7:</i></p> <p>Cada Parte establecerá, tan pronto como sea factible y a más tardar cinco años después de la fecha de entrada en vigor del Convenio para ella, un inventario de las emisiones de las fuentes pertinentes, que mantendrá a partir de entonces.</p>	<p>El INELM en México se realizó en 2017, por lo cual se debe mantener actualizado, el presente trabajo actualizará el factor de entrada en extracción y producción primaria de mercurio.</p>
<p><i>Artículo 9 “Liberaciones”, párrafo 1:</i></p> <p>El presente artículo trata del control y, cuando sea viable, la reducción de las liberaciones de mercurio y compuestos de mercurio, a menudo expresadas como “mercurio total”, al suelo y al agua procedentes de fuentes puntuales pertinentes no</p>	<p>Se debe conocer el panorama actual para poder plantear indicadores ambientales en control de calidad del</p>

Artículo del Convenio de Minamata	Aplicación al proyecto.
consideradas en otras disposiciones del presente Convenio.	agua y suelo.
<p><i>Artículo 9 "Liberaciones", párrafo 4:</i></p> <p>Una Parte en la que haya fuentes pertinentes adoptará medidas para controlar las liberaciones y podrá preparar un plan nacional en el que se expongan las medidas que deben adoptarse para controlar las liberaciones, así como las metas, los objetivos y los resultados que prevé obtener. Esos planes se presentarán a la Conferencia de las Partes en un plazo de cuatro años desde la fecha de entrada en vigor del Convenio para esa Parte. Si una Parte decidiera elaborar un plan de aplicación con arreglo a lo establecido en el artículo 20, podrá incluir en su texto el plan que se contempla en el presente párrafo.</p>	<p>Conocidos los resultados del panorama actual se pueden establecer directrices en el plan nacional que se presentará a la Conferencia de las Partes en 2021</p>
<p><i>Artículo 9 "Liberaciones", párrafo 6:</i></p> <p>Cada Parte establecerá, tan pronto como sea factible y a más tardar cinco años después de la fecha de entrada en vigor del Convenio para ella, un inventario de las liberaciones de las fuentes pertinentes, que mantendrá a partir de entonces.</p>	<p>El presente trabajó actualizará el factor de entrada en extracción y producción primaria de mercurio.</p>
<p><i>Artículo 11 "Desechos de mercurio", párrafo 2:</i></p> <p>A los efectos del presente Convenio, por desechos de mercurio se entienden sustancias u objetos:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) que constan de mercurio o compuestos de mercurio; b) que contienen mercurio o compuestos de mercurio; o c) contaminados con mercurio o compuestos de mercurio, en una cantidad que exceda los umbrales pertinentes definidos por la Conferencia de las Partes, en colaboración con los órganos pertinentes del Convenio de Basilea de manera armonizada, a cuya eliminación se procede, se propone proceder o se está 	<p>Conociendo las concentraciones de los residuos mineros se podrá conocer si se deben considerar o no como desechos de mercurio.</p>

Artículo del Convenio de Minamata	Aplicación al proyecto.
<p>obligado a proceder en virtud de lo dispuesto en la legislación nacional o en el presente Convenio. Se excluyen de esta definición la roca de recubrimiento, de desecho y los desechos de la minería, salvo los derivados de la extracción primaria de mercurio, a menos que contengan cantidades de mercurio o compuestos de mercurio que excedan los umbrales definidos por la Conferencia de las Partes.</p>	
<p><i>Artículo 14 “Creación de capacidad, asistencia técnica y transferencia de tecnología” párrafo 1:</i></p> <p>Las Partes cooperarán, en la medida de sus respectivas posibilidades y de manera oportuna y adecuada, en la creación de capacidad y la prestación de asistencia técnica en beneficio de las Partes que son países en desarrollo, en particular las Partes que son países menos adelantados o pequeños Estados insulares en desarrollo, y las Partes con economías en transición, a fin de ayudarlas a cumplir las obligaciones contraídas en virtud del presente Convenio</p>	<p>Una vez probadas las técnicas de muestreo y análisis, se pueden reproducir en países o regiones menos adelantados o pequeños, con el fin de cumplir las obligaciones que provee el Convenio</p>
<p><i>Artículo 17 “Intercambio de información”, párrafo 1:</i></p> <p>Cada Parte facilitará el intercambio de:</p> <p>a) Información científica, técnica, económica y jurídica relativa al mercurio y los compuestos de mercurio, incluida información toxicológica, ecotoxicológica y sobre seguridad;</p> <p>b) Información sobre la reducción o eliminación de la producción, el uso, el comercio, las emisiones y las liberaciones de mercurio y compuestos de mercurio;</p> <p>c) Información sobre alternativas viables desde el punto de vista técnico y económico a:</p>	<p>Esta información se presentará en la Conferencia de las Partes como parte del diagnóstico nacional sobre el uso de mercurio.</p>

Artículo del Convenio de Minamata	Aplicación al proyecto.
<p>i) los productos con mercurio añadido;</p> <p>ii) los procesos de fabricación en los que se utiliza mercurio o compuestos de mercurio; y</p> <p>iii) las actividades y los procesos que emiten o liberan mercurio o compuestos de mercurio;</p> <p>incluida información relativa a los riesgos para la salud y el medio ambiente y a los costos y beneficios económicos y sociales de esas alternativas; e</p> <p>d) Información epidemiológica relativa a los efectos para la salud asociados con la exposición al mercurio y los compuestos de mercurio, en estrecha cooperación con la Organización Mundial de la Salud y otras organizaciones pertinentes, según proceda.</p>	
<p><i>Artículo 18 “Información, sensibilización y formación del público”, párrafo 1:</i></p> <p>Cada Parte, con arreglo a sus capacidades, promoverá y facilitará:</p> <p>a) El acceso del público a información disponible sobre:</p> <p>i) Los efectos del mercurio y los compuestos de mercurio para la salud y el medio ambiente;</p> <p>ii) Alternativas al mercurio y los compuestos de mercurio;</p> <p>iii) Los temas que figuran en el párrafo 1 del artículo 17;</p> <p>iv) Los resultados de las actividades de investigación, desarrollo y vigilancia que realice de conformidad con el artículo 19; y</p> <p>v) Las actividades destinadas a cumplir las obligaciones contraídas en virtud del presente Convenio;</p>	<p>La investigación del presente trabajo será de carácter público, ayudando a sensibilizar y formar un criterio de la población general.</p>

Artículo del Convenio de Minamata	Aplicación al proyecto.
<p>b) La formación, la capacitación y la sensibilización del público en relación con los efectos de la exposición al mercurio y los compuestos de mercurio para la salud humana y el medio ambiente, en colaboración con organizaciones intergubernamentales y no gubernamentales pertinentes y con poblaciones vulnerables, según proceda</p>	
<p><i>Artículo 19 "Investigación, desarrollo y vigilancia", párrafo 1:</i></p> <p>Las Partes se esforzarán por cooperar, teniendo en consideración sus respectivas circunstancias y capacidades, en la elaboración y el mejoramiento de:</p> <p>a) Los inventarios del uso, el consumo y las emisiones antropógenas al aire, y de las liberaciones al agua y al suelo, de mercurio y compuestos de mercurio;</p> <p>b) La elaboración de modelos y la vigilancia geográficamente representativa de los niveles de mercurio y compuestos de mercurio en poblaciones vulnerables y el entorno, incluidos medios bióticos como los peces, los mamíferos marinos, las tortugas marinas y los pájaros, así como la colaboración en la recopilación y el intercambio de muestras pertinentes y apropiadas;</p> <p>c) Las evaluaciones de los efectos del mercurio y los compuestos de mercurio para la salud humana y el medio ambiente, además de los efectos sociales, económicos y culturales, especialmente en lo que respecta a las poblaciones vulnerables;</p> <p>d) Las metodologías armonizadas para las actividades realizadas en el ámbito de los apartados a), b) y c) precedentes;</p> <p>e) La información sobre el ciclo ambiental, el transporte (incluidos el transporte y la deposición a larga distancia), la transformación</p>	<p>Este proyecto forma parte del compromiso de continua investigación para mejorar los inventarios presentados por México</p>

Artículo del Convenio de Minamata	Aplicación al proyecto.
<p>y el destino del mercurio y los compuestos de mercurio en un conjunto de ecosistemas, teniendo debidamente en cuenta la distinción entre las emisiones y liberaciones antropógenas y naturales de mercurio y la nueva movilización de mercurio procedente de su deposición histórica;</p> <p>f) La información sobre el comercio y el intercambio de mercurio y compuestos de mercurio y productos con mercurio añadido; y</p> <p>g) La información e investigación sobre la disponibilidad técnica y económica de productos y procesos que no utilicen mercurio, y sobre las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales para reducir y monitorizar las emisiones y liberaciones de mercurio y compuestos de mercurio</p>	

Fuente: Adaptado de (Díaz-Barriga, 2017).

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1 CAMPAÑA DE MUESTREO

La metodología consta de 8 pasos como se muestra en la Figura 3.1:



Figura 3.1 Metodología propuesta. Fuente: Elaboración propia

3.1.1 CAPACITACIÓN PARA USO DE EQUIPOS DE CAMPO

El INECC cuenta con el equipo LUMEX RA 915+ el cual es un equipo portátil que mide concentración de vapor de mercurio en aire ambiente. Cuenta con la habilidad de poder usar celdas analíticas de una o varias vías, según la función que se necesite desempeñe; los límites de detección para la celda de una vía van de 500-200,000 ng/m³ ideal para muestreos en zonas con altas concentraciones de mercurio y en el caso de la operación de celda multi vías va de 2-20,000 ng/m³, ideal para muestreos de fondo.

El funcionamiento de este analizador se basa en la espectrometría de absorción atómica diferencial de Zeeman utilizando la modulación de alta frecuencia de la polarización de la luz (ZAAS-HFM). En ésta, una lámpara de mercurio se pone en un campo magnético permanente. La línea de resonancia de $\lambda=254$ nm se divide en 3 componentes, un fotodetector solo detecta los componentes de la radiación σ_{-} , uno cae dentro del perfil de la línea de absorción y otro se encuentra afuera. La diferencia entre estas intensidades es proporcional a la concentración del vapor de mercurio.

Además, se cuenta con la colaboración del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la cual proporcionó una estación meteorológica portátil Davis Vantage Pro-2, para lo cual el mismo CCA capacitó para su instalación y uso adecuado

Esta estación es capaz de registrar datos de velocidad del viento, dirección del viento, temperatura, presión, precipitación, radiación solar, entre otros, en tiempo real durante todo el periodo de muestreo.

3.1.2 SELECCIÓN DEL SITIO DE MUESTREO

Para la selección del sitio donde se realizó el muestreo, se consideraron diversos puntos. La Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades de Estados Unidos (ATSDR) señala que los elementos para identificar una vía de exposición son cinco (ATSDR, 2019):

1. Fuente de contaminación;
2. Medios para el desplazamiento de contaminantes;

3. Puntos de exposición;

4. Ruta de exposición, y

5. Población receptora.

Como se mencionaba en capítulos anteriores, las mayores reservas de mercurio identificadas en México se localizan principalmente en los estados de Querétaro y Zacatecas, por lo cual, estos estados parecen albergar los sitios adecuados para el desarrollo del proyecto. Considerando todos los puntos mencionados anteriormente se seleccionó el sitio que se muestra en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1 Selección de sitios

Mina “La Soledad”, Pinal de Amoles, Querétaro y Mina “Camargo, Peñamiller, Querétaro.	
Fuente de contaminación	Minas subterráneas de mercurio proveniente de cinabrio (HgS)
Medios para el desplazamiento del contaminante	Aire, suelo superficial, biota, agua superficial.
Puntos de exposición	Zonas de hornos de recuperación de mercurio
Ruta de exposición	Ingestión, inhalación, contacto dérmico y absorción cutánea.
Población receptora	Mineros de la comunidad de “San Gaspar” y “Camargo”

PINAL DE AMOLES

Es uno de los 18 municipios del estado de Querétaro, localizado a 150 km de la capital del estado. La ruta inicia sobre la autopista Querétaro-México y se continúa por la carretera a Bernal, hasta llegar al cruce de San Pablo-Tolimán-Higuerillas; desde donde inicia un recorrido sinuoso hasta llegar a Pinal de Amoles (Amoles, 2019).

Forma parte junto con otros 6 municipios al Área Natural Protegida de la Sierra Gorda, declarada Reserva de la Biosfera por la gran biodiversidad y los distintos ecosistemas que encierra (Querétaro, 2019)

El municipio se encuentra al norte del estado y colinda al norte con el municipio Arroyo Seco; al sur con los municipios San Joaquín y Cadereyta de Montes; al este con los

municipios de Jalpan de Serra y San Joaquín; y al oeste con el municipio de Peñamiller y el estado de Guanajuato (Amoles, 2019).

El municipio se encuentra ubicado geográficamente en las coordenadas: entre 99° 26' y 99°43' LW del meridiano de Greenwich y los paralelos 20°58' y 21°21' de latitud norte. Tiene una extensión de 705.543 km² que representa el 6.091% de la superficie estatal (Amoles, 2019) y tiene una población de 25,325 habitantes.

Orografía. Pinal de Amoles se encuentra en una zona accidentada, con pendientes pronunciadas, así como planicies y mesetas pequeñas. La altitud sobre el nivel del mar es muy variable, oscilando entre los 740 msnm hasta los 3,160 msnm (Amoles, 2019).

Hidrografía: Las corrientes pluviales son en su mayoría torrenciales, aunque existen pequeños manantiales dispersos en todo el territorio municipal. A través de él, cruzan dos ríos de importancia que son el Extoraz que corre de la parte sur en dirección oriente y El Rodezno o Río Escanela, que atraviesa por la comunidad de Escanela, Escanelilla y Ahuacatlán, y desemboca en la presa de Jalpan de Serra (Amoles, 2019).

Clima. se presentan tres tipos de climas bien diferenciados (Amoles, 2019):

Templado húmedo. Con lluvias en verano y temperatura media anual de entre los 12°C y los 18°C, verano cálido, con poca lluvia invernal, extremosa y marca de la temperatura tipo Ganges con una precipitación media anual de 850mm. Este clima se presenta en altitudes mayores a 2,000 msnm.

Semicálido húmedo. El más húmedo de los subhúmedos, con lluvias en verano y un bajo porcentaje de lluvias invernales, con verano cálido, extremoso y marca de la temperatura tipo Ganges. La precipitación media anual es de 992 mm.

Semicálido seco. Con temperaturas anuales de entre los 18°C y 22°C con régimen de lluvias de verano, escasa lluvia invernal, con oscilaciones de temperatura de entre los 7°C y 14°C. la precipitación media anual es de 509 mm.

Flora. Acorde a cada tipo de clima, se han desarrollado diferentes tipos de vegetación: selva baja caducifolia en la parte norte, bosques de pino-encino en la parte central y

noroeste. El bosque pino-encino es característico de los climas templados y alturas por arriba de los 2,000 msnm (Amoles, 2019).

Fauna. Dependiendo de la flora y clima, habitan diferentes tipos de especies de animales. Los más comunes son: venado cola blanca, puma, tigrillo, gato montés, pinto rabo, coyote, mapache, tlacuache, armadillo, zorra, zorrillo, liebre y conejo. También existe una gran variedad de aves: carpintero, jilguero, gorrión, chuin, perico, guacamaya verde, zopilote y cuervo. Del mismo modo habitan reptiles tales como víbora de cascabel y coralillo (Amoles, 2019).

Minería. Se da por cierto que los primeros pobladores fueron recolectores y cazadores, y se presume que su llegada se remota al año 6000 a.C. posteriormente se asentaron en este lugar diversas tribus, quedando constancia de las mismas en los innumerables cuesillos, así como en las minas de azogue que evidencian que a la llegada de los españoles ya se conocía el proceso de la amalgamación del oro sobre la base del azogue (Querétaro P. E., 2019).

Agricultura. El municipio cuenta con un total de 60,970 ha de las cuales, 32,901 ha son bosques inducidos, 23,176 ha son para actividades pecuarias y 4,893 ha están sembradas. Las principales superficies de riego se localizan en la misión de Bucareli con superficie de riego de 71 ha y Medias Coloradas, con una superficie de 32 ha que se destinan al cultivo para el autoconsumo de maíz, frijol, garbanzo, chile, papa y jitomate. La producción es utilizada principalmente para el autoconsumo y alguna parte para la comercialización (Querétaro P. E., 2019).

Ganadería. La superficie destinada para esta actividad es de 33,243 ha. En cuanto a ganado, se cuenta con 40,504 cabezas de bocino, 7,448 ovinos, 8,444 caprinos y 17,008 porcinos. Existe una asociación ganadera local, la cual se encarga de la adquisición de insumos y del mejoramiento de ganado a través de campañas de salud, limpieza y mejoramiento genético (Querétaro P. E., 2019).

Turismo. Pinal de Amoles se encuentra a una altura de 2,320 msnm, lo que propicia un clima frío con neblina ocasional; creando un paisaje de gran belleza. Sus bosques, cañadas, arroyos, cascadas y verdes campos son un deleite a la vista. Asimismo, sus

rústicas calles y coloridos balcones hacen de este lugar un espacio muy atractivo para quienes gozan de la naturaleza, la tranquilidad y las actividades al aire libre (Querétaro P. E., 2019).

PEÑAMILLER

Se localiza en el norte del estado de Querétaro entre las coordenadas geográficas 20°57' y 21° 14' de latitud norte y 99°42' y 100°02' de longitud Oeste; con altitudes que van desde los 1280 a 3000 msnm. Al norte y oeste colinda con el estado de Guanajuato; al sur con los municipios de Tolimán y Cadereyta de Montes y al este con los municipios de Pinal de Amoles y Cadereyta de Montes. Cuenta con una superficie de 694.9 km², lo que representa el 5.9% del total del estado (Peñamiller, 2018).

Orografía: Las elevaciones más importantes son: El Cerro del Piñón 3000 msnm; la Mesa de Salinas a 2460 msnm; El Campanario a 2120 msnm; La Tembladera a 2080 msnm; El Piloncito a 1980 msnm; El Cerro de Dios a 1900 msnm; y El Picacho a 1680 msnm (Peñamiller, 2018).

Hidrografía: El Municipio se encuentra bañado por las aguas de la cuenca del Río Extoraz, el cual recibe las precipitaciones pluviales de una superficie de 3 149 km²; y un escurrimiento disponible anual de 1 150 000 m³ de agua; que se capta de 16 municipios que forman la cuenca del Río Extoraz, en la que convergen los ríos Xichú, Victoria, Tierra Blanca y Tolimán; así como de los arroyos del Saucillo, Los Encinos, Higuierillas, y Del Buey. Sus aguas son abundantes y arrasadoras en la época de lluvias y escasas o ausentes en los meses de marzo a junio (Peñamiller, 2018).

Clima: Los climas que predominan en la región son: el semicálido-semiseco. La temporada de mayor calor se presenta durante los meses de mayo a agosto, con temperaturas de hasta 40.2°C. La temperatura promedio es de 21.7°C. Así mismo, el periodo de precipitación pluvial se presenta en el verano con un promedio de 434.5 mm anuales (Peñamiller, 2018).

Entre 1200 y 1400 msnm, prevalece el clima seco, semicálido con temperaturas que oscilan entre 2° C, hasta 35°C y con una temperatura media de 22°C. La precipitación pluvial es de 300 a 400 mm anuales, que definen condiciones desérticas perfectamente

observables al margen de las corrientes mencionadas. Los inviernos son bien definidos y las heladas se presentan cada 10 años (Peñamiller, 2018).

La parte media se encuentra ubicada entre los 1500 y 1800 msnm; considerándose como la transición al semi desierto alpino templado. Las temperaturas extremas son de -3°C. a 40°C como máximo, con un promedio de 20°C que determinan un clima templado (Peñamiller, 2018).

La parte alta se encuentra entre los 2000 y 3000 msnm, con temperaturas máximas de 25°C y mínimas de -5°C. El invierno es bien definido y la precipitación anual oscila entre los 500 y 600 mm (Peñamiller, 2018).

Aproximadamente son 60 días nublados los que se registran a lo largo del año.

Flora: El municipio de Peñamiller se encuentra protegido por la reserva de la Biosfera en un 80%. El tipo de vegetación que existe en Peñamiller en su mayor parte es el mezquital, además de bosque de encino - pino en la zona Oriente del Municipio y matorral desértico micrófilo en mínima proporción en la zona Sur (Peñamiller, 2018).

El mezquital que es una planta del tipo del bosque caducifolio. Es una comunidad vegetal propia de climas áridos o sub-áridos que habita regularmente en lugares planos de suelos profundos. Predomina en su estructura el género *prosopis spp* (mezquite); el cual, en la mayoría de los casos, es el único competente arbóreo.

Existen además otros tipos de vegetación dentro de la misma familia, como el palo bobo, uña de gato, huisache, granjeno y palo sishote, con los que se mezclan algunos cactus, tales como nopal, orégano y biznaga; lo que hace que en la región de Higuierillas y Peña Blanca se encuentre la zona más desértica del estado de Querétaro (Peñamiller, 2018).

Fauna: La fauna que predomina es la apta del semi desierto como los son varias especies de paloma, huilota, tórtola, codorniz, conejo, ardilla, zorrillo, comadreja, cacomiztle, mapache, tejón, coyote, zorra, armadillo y reptiles de varias especies, destacando los más venenosos coralillos, y cascabel (Peñamiller, 2018).

En La Higuera y Río Blanco habitan diversas especies de peces como trucha arco iris, tilapia, bagre y carpa. En Molinitos, Mesa del Troje y Río Blanco también se encuentra venado cola blanca, temazate, jabalí y puma.

Minería: En el municipio de Peñamiller abundan yacimientos de diversos minerales y el mercurio fue el más explotado. Se tienen registradas 128 bocaminas que se explotaron en las décadas de los 60s, 70s, y parte de los 80s, del siglo XX; y a consecuencia de la caída del precio del metal después de la guerra de EE. UU. contra Vietnam, se dejaron de trabajar (Peñamiller, 2018).

Agricultura: Existen otros recursos propios de este lugar como piñón, maguey, nopal, pitahayo, garambullo, guamishi y yucas, de las cuales el piñón es el más rentable, aun cuando la cosecha más abundante es cada cuatro años. La producción de piñón es en los ejidos de Maguey Verde, La Higuera, Camargo, Los Encinos, Río Blanco, Agua Fría y Molinitos. Le sigue en importancia la producción de aguacate y la ciruela mexicana entre otras. El uso actual del suelo se encuentra distribuido de la siguiente manera: agrícola de riego 1 045 has; agrícola de temporal 916 has; forestal maderable 20 000 has; agostadero de mala calidad 36,954 has; y otros usos 10 487 has; lo cual hace un total de 69,409 has (Peñamiller, 2018).

3.1.3 SOLICITUD DE PERMISOS CORRESPONDIENTES

La Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental (CGCSA) del INECC fue la encargada de gestionar los permisos correspondientes para tener acceso a las minas y sitios de muestro. Para esto, se contactó al gobierno de Querétaro por medio del Director de Desarrollo Regional de la Secretaría de Desarrollo Sustentable (SEDESU), el Lic. Mauricio Aguilera Salgado, el cual entró en contacto con los ejidatarios de las minas a muestrear, así como con el Ing. Leonardo Herrera, ex director de minería para el apoyo de traslados y contacto con los mineros.

3.1.4 PLAN DE MUESTREO

Se realizaron dos campañas de muestreo, la primera en abril de 2019 en temporada de secas y otra en agosto del mismo año para obtener muestras en temporada de lluvias.

CAMPAÑA ABRIL-2019

En esta campaña se planearon 4 muestreos teniendo como objetivo la mina “La Soledad” además de un sitio de fondo cercano a “Puerta del cielo”:

- 1) Muestreo exploratorio en suelo (Mina La Soledad)
- 2) Muestreo de fondo en suelo (Sitio Puerta del Cielo)
- 3) Muestreo exploratorio en aire (Mina La Soledad)
- 4) Muestreo de fondo en aire (Sitio Puerta del Cielo)

CAMPAÑA AGOSTO-2019

Para esta campaña se planearon 7 muestreos con el fin de comparar los resultados obtenidos en la primera campaña de la mina “La Soledad” agregando muestro en la matriz ambiental de agua y como complemento muestreando en la mina “Camargo” ubicada en los límites del municipio Peñamiller colindando con Pinal de Amoles.

- 1) Muestreo de suelo (Mina La Soledad)
- 2) Muestreo de aire en zona de hornos (Mina La Soledad)
- 3) Muestreo exploratorio en cuerpos de agua (Mina La Soledad)
- 4) Muestreo exploratorio en suelo (Mina Camargo)
- 5) Muestreo exploratorio en aire (Mina Camargo)
- 6) Muestreo de fondo en suelo (Sitio Puerta del Cielo)
- 7) Muestreo de fondo en aire (Sitio Puerta del Cielo)

3.1.5 CAMPAÑA DE MUESTREO IN SITU EXPLORATORIO Y DE FONDO

Una vez obtenidos los permisos, se debe preparar la campaña de muestreo de al menos 3 días, un día para el reconocimiento del sitio y dos días para realizar los muestreos exploratorios y de fondo.

Esto en coordinación con la CGCSA del INECC, el gobierno del estado de Querétaro, la población de San Gaspar, la comunidad minera de Camargo y la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

La metodología del muestreo se describe en la figura 3.2.



Figura 3.2 Metodología para toma de muestras. Fuente: Elaboración propia

3.1.6 ANÁLISIS DE MUESTRAS

Los equipos por utilizar para el análisis de aire tienen la virtud de proveer datos en tiempo real, por lo cual se instalarán en los sitios previstos y se recolectarán los datos para su posterior tratamiento en gabinete.

En el caso de las muestras de suelos, se seguirá la metodología que se describe en la figura 3.3.

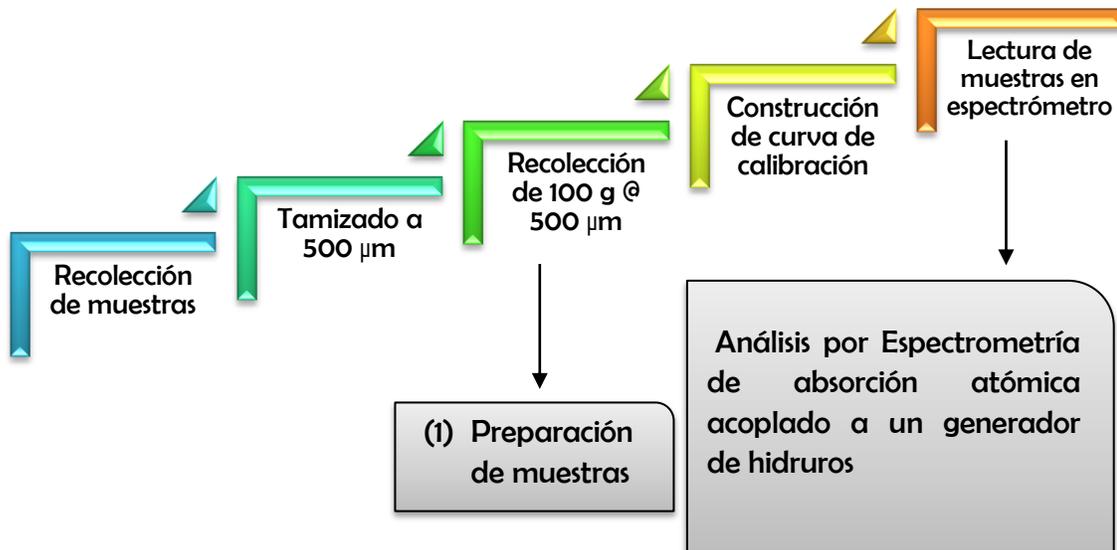


Figura 3.3 Metodología para análisis de suelo. Fuente: elaboración propia

- (1) La técnica principal para analizar el total de las muestras de agua y suelo fue por la espectrometría de absorción atómica Perkin Elmer ® 31110, acoplado a un generador de hidruros (métodos EPA 7471B para suelo y EPA 245.1 para agua) proporcionado por la Unidad de Gestión Ambiental (UGA) de la Facultad de Química de la UNAM.

Para esto, se necesita preparar las muestras como se describe en la Figura 3.4. en el caso de las muestras de agua, se realizó la lectura directa de la muestra recolectada , al no presentar concentración de mercurio detectable, se concluyó que estaba por debajo de los límites de detección del equipo. Todas las muestras se trabajarán por duplicado.

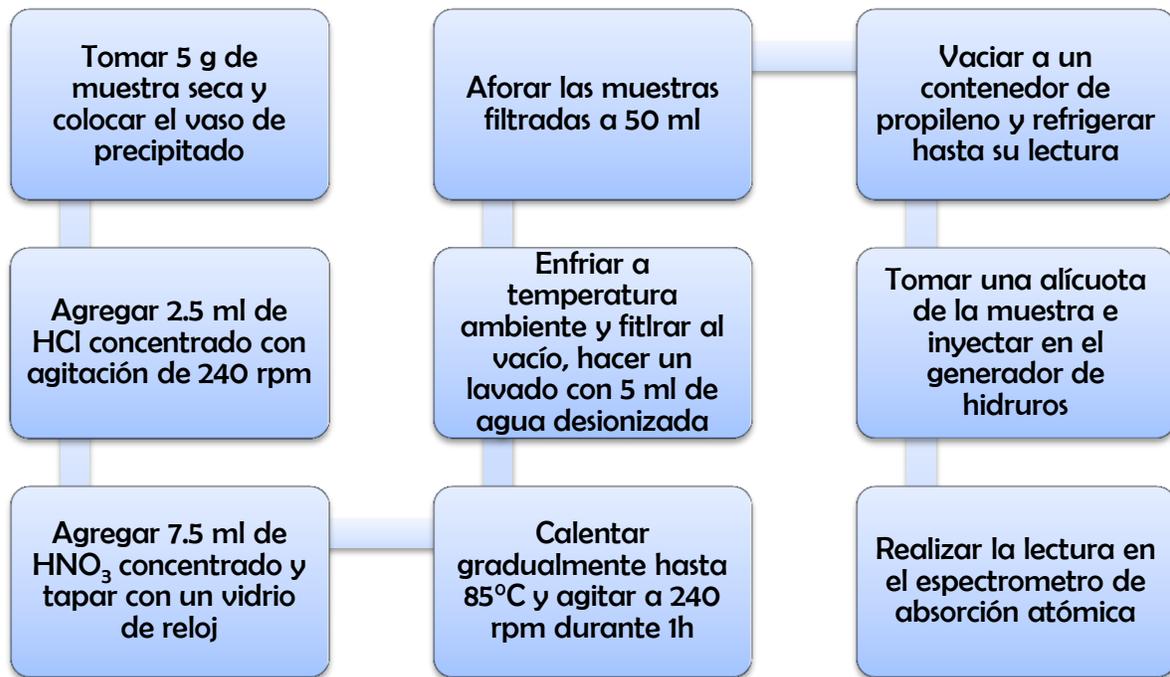


Figura 3.4 Preparación de muestras de suelo Fuente: elaboración propia con base en el procedimiento EPA 7061

3.1.7 TRATAMIENTO DE RESULTADOS

El tratamiento de resultados se realizará en el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, con el fin de determinar las concentraciones de mercurio en el aire, agua y el suelo, en al menos una zona de minería de mercurio activa. Además de analizar la concentración de mercurio que queda como cenizas en los hornos para determinar si se debe disponer como residuo peligroso propio del proceso de beneficio minero y así obtener su contribución porcentual en el factor de distribución.

3.1.8 TRABAJO DE GABINETE

Una vez obtenidos los resultados de las muestras, se identificarán las zonas más contaminadas por el mercurio. Esto con ayuda de mapas, rosas de los vientos, rosas de contaminantes y análisis estadístico descriptivo.

3.2 DISEÑO ESTADÍSTICO DE EXPERIMENTOS

El diseño estadístico de experimentos es el proceso de “planear” el experimento de tal manera que se puedan analizar por métodos estadísticos los datos recolectados que resulten en conclusiones objetivas y válidas

Esta investigación se puede clasificar como descriptiva, transversal, prospectiva y experimental. Debido a los objetivos establecidos, no se considera como apta para proponer un diseño de experimentos.

Sin embargo, se establecerán los lineamientos adaptados a las necesidades de la investigación para poder validar los datos obtenidos durante el trabajo “experimental”.

1) Reconocimiento y establecimiento del problema.

¿Cuál es la concentración de mercurio liberada al aire, suelo, agua, como producto y como residuo?

2) Definir factores, niveles y tratamientos.

Factor: característica a controlar, cuyo efecto queremos estudiar. Contaminación por mercurio.

Nivel: categoría estudiada del factor. 6 factores, aire, agua, suelo, producto, residuos generales y tratamiento de residuos del sector específico.

Tratamiento: combinación de niveles de los factores estudiados. 1x6 = 6.

3) Definir la unidad experimental (u.e.).

La unidad experimental es la subdivisión menor del material experimental que puede recibir un tratamiento en forma independiente. Mina “La Soledad” y Mina “Camargo”.

4) Definir la variable de respuesta.

Lo que se va a medir en cada unidad experimental. Concentración de mercurio [ng/m³].

5) Elección del diseño experimental.

En el caso de los muestreos de suelo y agua, se tomarán duplicado de cada punto. Esto utilizando espectrometría de absorción atómica para cada muestra. Posteriormente se obtendrán datos de estadística descriptiva para obtener el factor de distribución para la matriz de suelo.

Para el análisis de aire, al obtener datos en tiempo real, únicamente se diferenciará la concentración de fondo a la del sitio y se obtendrá el factor de distribución para dicha matriz.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las campañas se realizaron dentro del estado de Querétaro en las minas de “La Soledad” en el municipio de Pinal de Amoles y en “Camargo” en el municipio de Peñamiller, esto dentro del Área Natural Protegida “Sierra Gorda” (Figura 4.1).

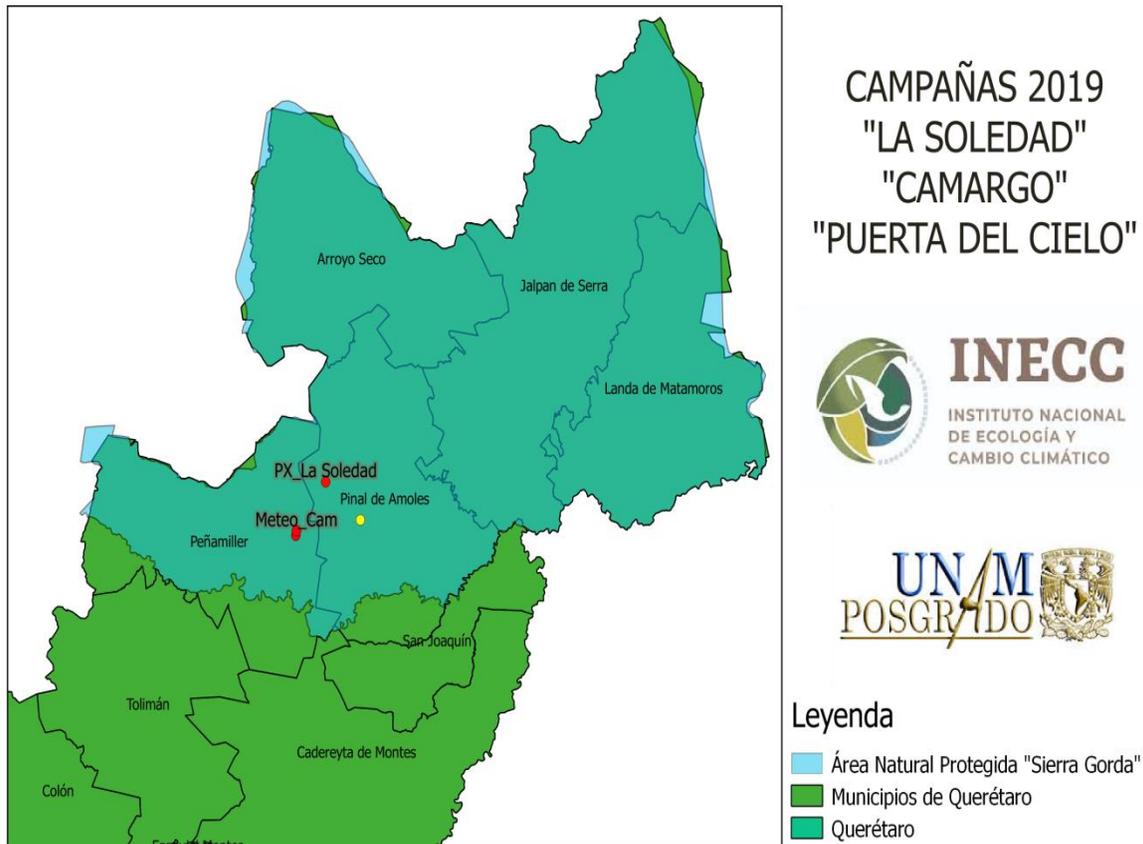


Figura 4.1 Ubicación de las zonas muestreadas. Fuente: Elaboración propia

4.1 PRIMER CAMPAÑA – ABRIL, 2019.

La primera campaña se realizó del 10 al 12 de abril de 2019, en la cual se pudieron muestrear las matrices de aire y suelo en la mina “La Soledad”, además de un sitio de fondo “Puerta del Cielo”. El muestreo en agua no fue permitido en la mina, en el sitio de fondo no hay cuerpos de agua disponibles.

4.1.1 MUESTREO EXPLORATORIO DE SUELO “LA SOLEDAD I”

Se visitó la Mina “La Soledad” ubicada en el municipio de Pinal de Amoles en las coordenadas 21°09.707' N y -99°40.613' W a una altura de 2765 msnm. La extracción de mercurio se realiza por medio de hornos y se describe en la siguiente figura:



Figura 4.2 Proceso de extracción primaria artesanal de mercurio. Fuente: elaboración propia.

En este primer muestreo, se tomaron 16 puntos a diferentes distancias de la bocamina, la ruta comenzó en el inicio de descenso a la mina, hasta llegar a la bocamina, tomando puntos en la zona de hornos.

Estas muestras se mantuvieron a 4°C y se trabajaron en el laboratorio de la Unidad de Gestión Ambiental de la Facultad de Química de la UNAM. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.1 Resultados de muestras "La Soledad" campaña abril, 2019

Clave	Fecha	Coordenadas		Altura msnm	pH	Temp. Suelo	[Hg]
		N	W			°C	mg/kg
01_EXPSOL1	11/04/2019	21°9.522'	-99°40.662'	2934	7.6	19	55.061
02_EXPSOL1	11/04/2019	21°9.545'	-99°40.673'	2930	7.1	18	88.044
03_EXPSOL1	11/04/2019	21°9.564'	-99°40.681'	2927	7.4	20	24.332
04_EXPSOL1	11/04/2019	21°9.648'	-99°40.677'	2851	7.6	18	40.177
05_EXPSOL1	11/04/2019	21°9.757'	-99°40.600'	2766	7.6	18	49.984
06_EXPSOL1	11/04/2019	21°9.732'	-99°40.609'	2764	9.8	26	399.514
07_EXPSOL1	11/04/2019	21°9.721'	-99°40.621'	2766	8.7	18	434.291
08_EXPSOL1	11/04/2019	21°9.711'	-99°40.625'	2765	8.2	21	608.640
09_EXPSOL1	11/04/2019	21°9.714'	-99°40.616'	2765	8.9	22	612.452
10_EXPSOL1	11/04/2019	21°9.712'	-99°40.616'	2765	8.1	23	470.784
11_EXPSOL1	11/04/2019	21°9.709'	-99°40.607'	2765	8.7	20	682.179
12_EXPSOL1	11/04/2019	21°9.708'	-99°40.609'	2765	12.3	19	479.411
13_EXPSOL1	11/04/2019	21°9.713'	-99°40.605'	2765	12.3	23	500.641
14_EXPSOL1	11/04/2019	21°9.709'	-99°40.612'	2765	12.4	20	665.518
15_EXPSOL1	11/04/2019	21°9.708'	-99°40.615'	2765	8.4	22	865.833
16_EXPSOL1	11/04/2019	21°9.709'	-99°40.617'	2765	9.4	19	834.033

En las figuras 4.3 y 4.4, se muestran los mapas de los puntos muestreados, tomando la distancia a la que se encuentran de la bocamina.



Figura 4.3 Mapa de muestreo en suelo Mina "La Soledad" abril 2019

La estadística descriptiva muestra los siguientes valores:

Mínimo: 24.33 mg/kg

1er cuartil: 79.80 mg/kg

Mediana: 475.10 mg/kg

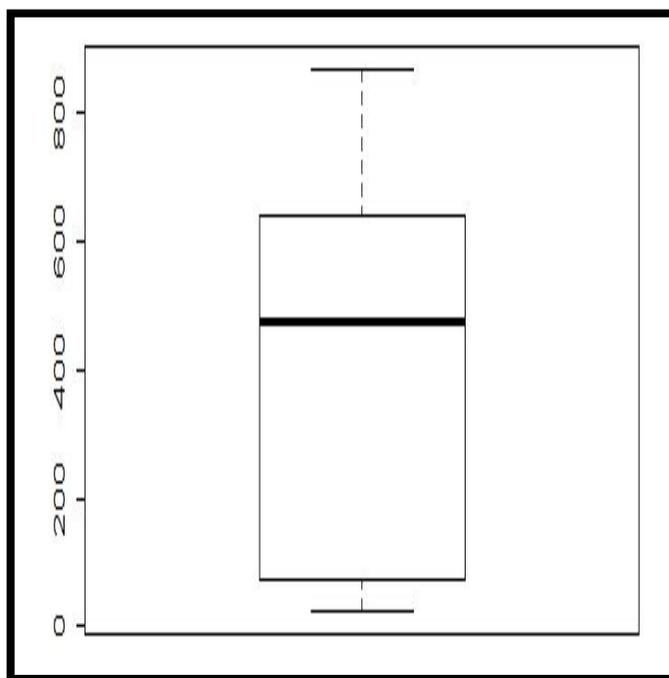
Promedio: 425.68 mg/kg

3er cuartil: 625.72 mg/kg

Máximo: 865.83 mg/kg

Desviación estándar: 290.47

Varianza: 84376.99



4.1.2 MUESTREO EXPLORATORIO DE AIRE “LA SOLEDAD 1”

Para el muestreo de aire, se realizaron 3 rutas durante el día para analizar las concentraciones al inicio de la jornada laboral, durante el transcurso de esta y al terminar los trabajos de la mina.

La Ruta 1 (Figura 4.5) va de la desviación de carretera federal para el poblado de San Gaspar, hasta el acceso a la mina durante el inicio de la jornada laboral, la Ruta 2 (Figura 4.6) de la bocamina al inicio de la zona habitacional durante la explotación del cinabrio y, la Ruta 3 (Figura 4.) del inicio de la zona habitacional hasta la carretera federal una vez terminada la jornada laboral.

Las mediciones se realizaron con el equipo LUMEX RA-915+; A continuación, se muestran los mapas y sus resultados obtenidos:

Ruta 1: Previo a la explotación de mercurio

Tabla 4.2 Resultados del monitoreo en aire en la ruta 1 "La Soledad"

Nombre	Coordenadas		Distancia al punto de emisión (Δx) m	Altura m	ΔH M	[Hg] ng/m ³
	N	W				
A_EXPSOL_01A	21°08.103'	99°41.524'	3349.74	2903	138	125
A_EXPSOL_02A	21°08.525'	99°41.659'	2841.39	2900	135	111
A_EXPSOL_03A	21°09.330'	99°41.341'	1443.07	2907	142	172
A_EXPSOL_04A	21°09.519'	99°40.684'	377.42	2950	185	179
A_EXPSOL_05A	21°09.489'	99°40.548'	431.79	2954	189	192

Mínimo: 111.00 ng/m³

1er cuartil: 125.00 ng/m³

Mediana: 172.00 ng/m³

Promedio: 155.80 ng/m³

3er cuartil: 179.00 ng/m³

Máximo: 192.00 ng/m³

Desviación estándar: 35.59

Varianza: 1266.70

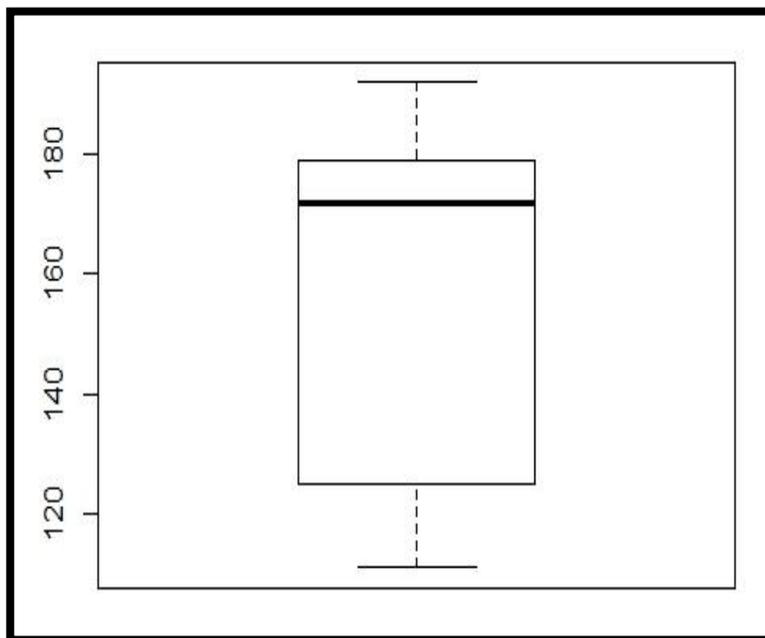




Figura 4.4 Ruta 1 Muestreo exploratorio en aire “La Soledad” abril 2019

Ruta 2: Durante la explotación de mercurio.

Tabla 4.3 Resultados del monitoreo en aire en la ruta 2 "La Soledad"

Nombre	Coordenadas		Distancia al punto de emisión (Δx)	Altura	ΔH	[Hg]
	N	W	m	m	m	ng/m ³
A_EXPSOL_01B	21°09.722'	99°40.620'	26.28	2766	1	7925
A_EXPSOL_02B	21°09.732	99°40.610'	42.63	2764	-1	1345
A_EXPSOL_03B	21°09.745'	99°40.593'	74.97	2764	-1	574
A_EXPSOL_04B	21°09.752'	99°40.592'	87.41	2766	1	513
A_EXPSOL_05B	21°09.7335'	99°40.623'	47.81	2774	9	617
A_EXPSOL_06B	21°09.683'	99°40.690'	141.98	2806	41	2878
A_EXPSOL_07B	21°09.668'	99°40.657'	106.6	2819	54	7343
A_EXPSOL_08B	21°09.662'	99°40.614'	86.17	2830	65	2994
A_EXPSOL_09B	21°09.653'	99°40.651'	122.72	2845	80	1788
A_EXPSOL_10B	21°09.632'	99°40.685'	190.04	2859	94	2704
A_EXPSOL_11B	21°09.605'	99°40.724'	272.06	2877	112	1881
A_EXPSOL_12B	21°09.600'	99°40.774'	345.66	2890	125	2168
A_EXPSOL_13B	21°09.597'	99°40.743'	308.77	2904	139	2493
A_EXPSOL_14B	21°09.569'	99°40.717'	318.68	2915	150	2287
A_EXPSOL_15B	21°09.562'	99°40.679'	297.2	2927	162	1129
A_EXPSOL_16B	21°09.518'	99°40.657'	365.27	2934	169	1609
A_EXPSOL_17B	21°09.497'	99°40.627'	398.35	2937	172	529

Mínimo: 513.00 ng/m³

1er cuartil: 1129.00 ng/m³

Mediana: 1881.00 ng/m³

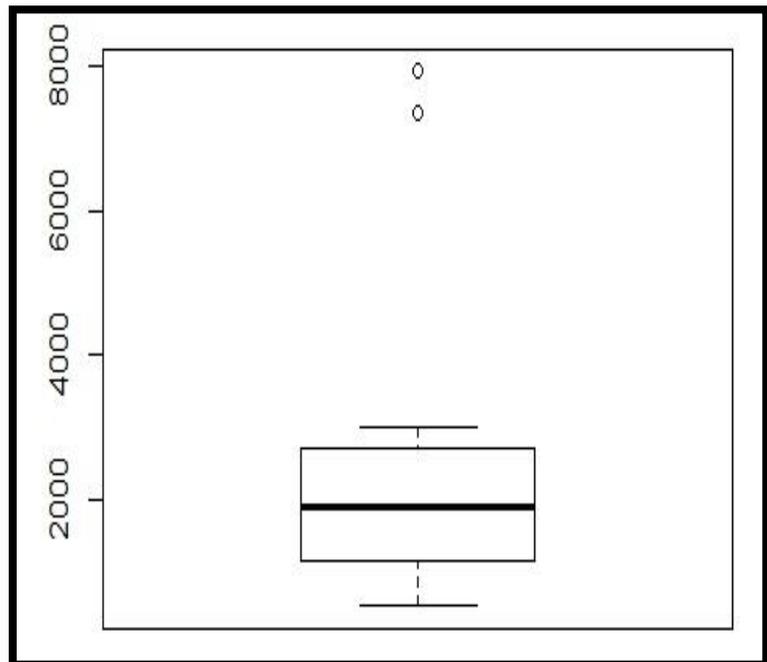
Promedio: 2399.00 ng/m³

3er cuartil: 2704.00 ng/m³

Máximo: 7925.00 ng/m³

Desviación estándar: 2140.10

Varianza: 4,580,040.00



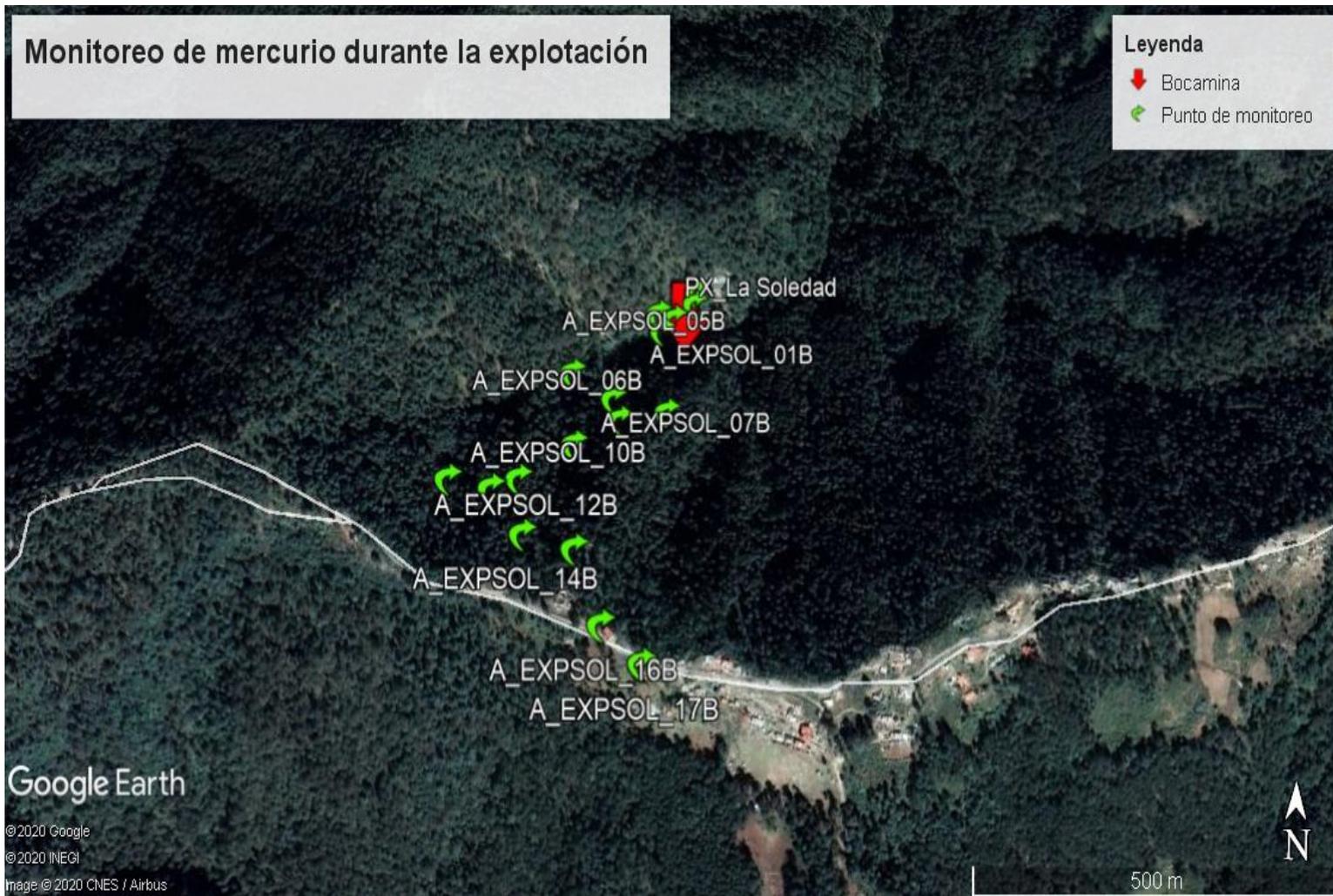


Figura 4.5 Ruta 2 Muestreo exploratorio en aire "La Soledad" abril 2019

Ruta 3: Posterior a la explotación de mercurio.

Tabla 4.4 Resultados del monitoreo en aire en la ruta 3 "La Soledad"

Nombre	Coordenadas		Distancia al punto de emisión (Δx)	Altura	ΔH	[Hg]
	N	W				
A_EXPSOL_01C	21°09.491'	99°40.545'	433.36	2942	177	75
A_EXPSOL_02C	21°09.506'	99°40.651'	394.37	2943	178	75
A_EXPSOL_03C	21°09.537'	99°40.740'	401.04	2963	198	66
A_EXPSOL_04C	21°09.573'	99°40.861'	503.41	2974	209	88
A_EXPSOL_05C	21°09.590'	99°40.957'	641.05	2973	208	111
A_EXPSOL_06C	21°09.577'	99°41.059'	810.97	2984	219	127
A_EXPSOL_07C	21°09.532'	99°41.098'	909.47	2998	233	152
A_EXPSOL_08C	21°09.534'	99°41.231'	1125.04	3019	254	208
A_EXPSOL_09C	21°09.479'	99°41.281'	1243.44	3030	265	209
A_EXPSOL_10C	21°09.422'	99°41.336'	1367.45	3048	283	299
A_EXPSOL_11C	21°09.360'	99°41.327'	1414.82	3051	286	391
A_EXPSOL_12C	21°09.252'	99°41.352'	1551.61	3021	256	296
A_EXPSOL_13C	21°09.168'	99°41.346'	1630.03	2999	234	271
A_EXPSOL_14C	21°09.050'	99°41.379'	1810.95	2978	213	338
A_EXPSOL_15C	21°08.949'	99°41.459'	2033.84	2962	197	285
A_EXPSOL_16C	21°08.895'	99°41.494'	2149.29	2958	193	285
A_EXPSOL_17C	21°08.769'	99°41.471'	2293.28	2963	198	285
A_EXPSOL_18C	21°08.657'	99°41.581'	2573.02	2941	176	301
A_EXPSOL_19C	21°08.526'	99°41.654'	2842.53	2939	174	343
A_EXPSOL_20C	21°08.305'	99°41.651'	3163.96	2920	155	321
A_EXPSOL_21C	21°08.149'	99°41.538'	3305.57	2969	204	572
A_EXPSOL_22C	21°07.995'	99°41.284'	3382.38	2941	176	629
A_EXPSOL_23C	21°07.740'	99°41.190'	3781.85	2935	170	597
A_EXPSOL_24C	21°07.551'	99°41.098'	4079.84	2907	142	576
A_EXPSOL_25C	21°07.459'	99°40.971'	4208.26	2881	116	600
A_EXPSOL_26C	21°07.539'	99°40.711'	4019.15	2825	60	625
A_EXPSOL_27C	21°07.393'	99°40.724'	4287.56	2786	21	632
A_EXPSOL_28C	21°07.452'	99°40.677'	4172.21	2740	-25	637
A_EXPSOL_29C	21°07.431'	99°40.497'	4219.38	2661	-104	647
A_EXPSOL_30C	21°07.234'	99°40.437'	4586.1	2619	-146	625

Mínimo: 66.00 ng/m³

1er cuartil: 208.20 ng/m³

Mediana: 300.00 ng/m³

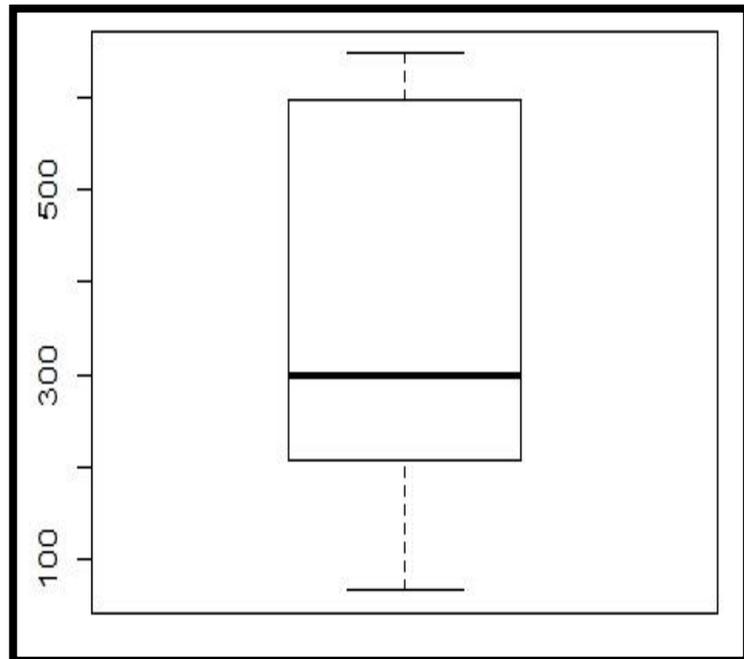
Promedio: 355.50 ng/m³

3er cuartil: 591.80 ng/m³

Máximo: 647.00 ng/m³

Desviación estándar: 204.97

Varianza: 42,011.00



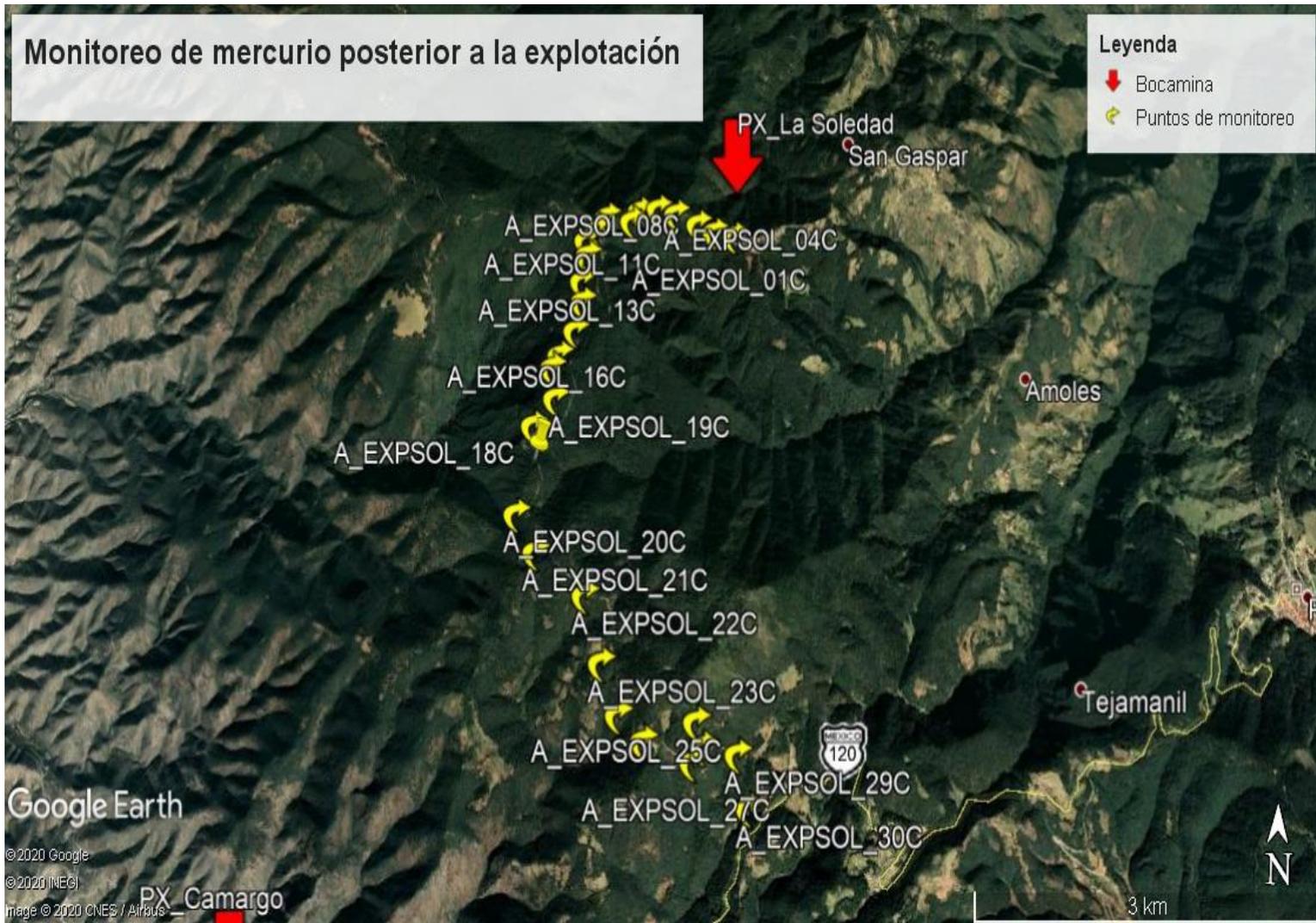


Figura 4.6 Ruta 3 Muestreo exploratorio en aire "La Soledad" abril 2019

4.1.3 MUESTREO DE FONDO EN SUELO “PUERTA DEL CIELO I”

El muestreo de fondo cumple con la finalidad de conocer la concentración del mercurio en el suelo de manera natural en la zona de estudio, para esto, se realizó un muestreo en una zona forestal cercana al sitio “Puerta del Cielo”. Los resultados del muestreo se presentan en la tabla 4.5:

Tabla 4.5 Resultados de muestras “Puerta del Cielo” campaña abril 2019

Clave	Coordenadas		pH	Temp. Suelo °C	[Hg] mg/kg	[Hg] promedio mg/kg
	N	W				
01_FONCIE	21°07'07.8"	-99°37'38.7"	7.6	12	8.702	8.335
03_FONCIE	21°07'06.0"	-99°37'38.2"	7.8	12	16.507	
05_FONCIE	21°07'06.7"	-99°37'40.8"	8	9	5.498	
06_FONCIE	21°07'04.6"	-99°37'41.2"	7.5	17	14.372	
07_FONCIE	21°07'04.1"	-99°37'40.8"	7.7	20	2.107	
08_FONCIE	21°07'06.6"	-99°37'41.2"	8.1	21	2.822	

Mínimo: 2.11 mg/kg

1er cuartil: 3.49 mg/kg

Mediana: 7.10 mg/kg

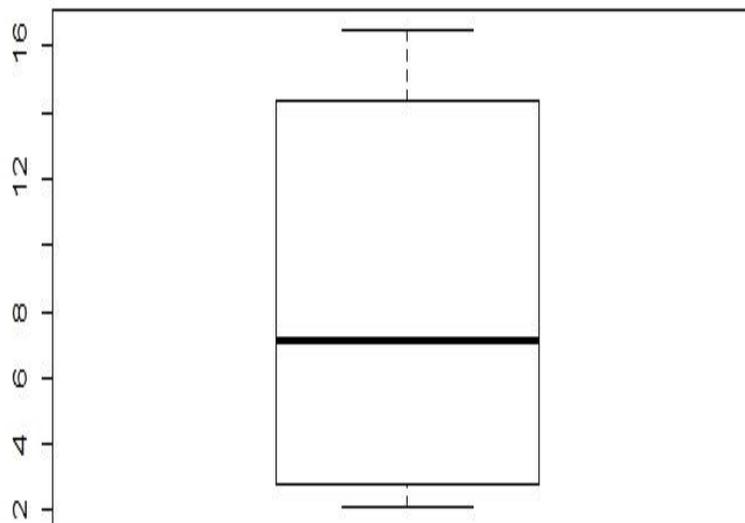
Promedio: 8.34 mg/kg

3er cuartil: 12.96 mg/kg

Máximo: 16.51 mg/kg

Desviación estándar: 6.01

Varianza: 36.12



El mapa en el cual se pueden identificar los puntos muestreados es el que se encuentra en la Figura 47:



Figura 4.7 Mapa de muestreo en suelo "Puerta del Cielo" campaña abril 2019

Para obtener un valor de fondo de concentración de mercurio en suelo, se promediaron las 6 muestras de fondo; así se obtuvo un valor de concentración de mercurio en suelo de 8.335 mg/kg por lo cual, a la concentración de las muestras de suelo en la mina, se le restó el valor de fondo y así se obtuvo la concentración final (Tabla 4.6):

Tabla 4.6 Concentración de mercurio en muestras de mina "La Soledad" abril 2019

Clave	[Hg]	[Hg]- [fondo]
	mg/kg	mg/kg
01_EXPSOL	55.061	46.726
02_EXPSOL	88.044	79.709
03_EXPSOL	24.332	15.998
04_EXPSOL	40.177	31.843
05_EXPSOL	49.984	41.649
06_EXPSOL	399.514	391.179
07_EXPSOL	434.291	425.956
08_EXPSOL	608.640	600.306
09_EXPSOL	612.452	604.118

Clave	[Hg]	[Hg]- [fondo]
	mg/kg	mg/kg
10_EXPSOL	470.784	462.449
11_EXPSOL	682.179	673.844
12_EXPSOL	479.411	471.076
13_EXPSOL	500.641	492.307
14_EXPSOL	665.518	657.183
15_EXPSOL	865.833	857.499
16_EXPSOL	834.033	825.698

4.1.4 MUESTREO DE FONDO EN AIRE "PUERTA DEL CIELO I"

El muestreo de fondo en aire indicará la concentración de mercurio en la zona. Para este muestreo, se localizó el equipo LUMEX RA-915+ en un punto fijo y se realizaron mediciones cada 5 minutos, los resultados se presentan en la tabla 4.7:

Tabla 4.7 Concentración de mercurio en sitio de fondo "Puerta del Cielo" abril 2019

Hora	Temp. Amb.	Vel. Viento	Direc. Viento	[Hg]	Hora	Temp. Amb.	Vel. Viento	Direc. Viento	[Hg]
	°C	m/s		ng/m3		°C	m/s		ng/m3
09:50	16.9	5.4	90	181	10:50	18.2	6.4	280	76
09:55	16.9	7.7	45	151	10:55	19	3.6	240	76
10:00	18.1	8.6	225	166	11:00	18.5	6.9	200	80
10:15	19.4	1.9	225	150	11:05	19.4	6.6	292.5	83
10:20	18.4	10.9	225	135	11:10	19.5	5.1	202.5	94
10:25	20.6	1.2	250	141	11:15	20.1	2.4	180	106
10:30	17.6	10.7	270	121	11:20	18.7	11.4	202.5	111
10:35	20	1.4	225	102	11:25	17.8	12.5	202.5	114
10:40	20.1	5.3	190	82	11:30	18.7	6.5	247.5	116
10:45	19.2	2.9	200	80	11:35	19	4.2	247.5	117

Hora	Temp. Amb.	Vel. Viento	Direc. Viento	[Hg]	Hora	Temp. Amb.	Vel. Viento	Direc. Viento	[Hg]
	°C	m/s		ng/m ³		°C	m/s		ng/m ³
11:40	19.1	7.2	247.5	115	12:10	18.9	7.4	247.5	107
11:45	19	4.9	247.5	111	12:15	19.7	2.9	247.5	103
11:50	18.4	8.9	202.5	109	12:20	20	2.4	202.5	103
11:55	18.1	5.6	202.5	110	12:25	20	3.4	202.5	102
12:00	18	6	180	109	12:30	20.8	1.9	202.5	105
12:05	18.5	3	180	108					

Mínimo: 76.00 ng/m³

1er cuartil: 102.00 ng/m³

Mediana: 109.00 ng/m³

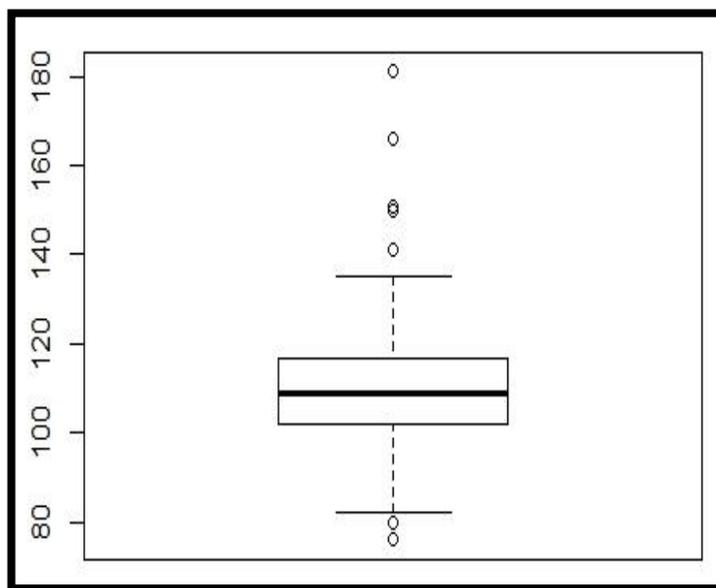
Promedio: 111.70 ng/m³

3er cuartil: 116.50 ng/m³

Máximo: 181.00 ng/m³

Desviación estándar: 25.40

Varianza: 645.40



4.2 SEGUNDA CAMPAÑA - AGOSTO, 2019.

La segunda campaña realizada del 20 al 22 de agosto aportó datos sobre la mina “La Soledad” en los puntos identificados como los más contaminados de acuerdo con la primera campaña, además de que la temporada de lluvias permitió tomar muestras de agua superficial en el río que nace en la bocamina. Por otro lado, también se muestreó en una nueva mina “Camargo” ubicada cerca a los límites entre los municipios de Pinal de Amoles y Peñamiller. Ambas minas se encontraban en producción activa de mercurio, con los hornos encendidos las 24 horas debido a la demanda creciente del metal en el mercado informal.

4.2.1 MUESTREO DE SUELO “LA SOLEDAD II”

En esta segunda ocasión al tener los resultados del muestreo de abril, se muestrearon únicamente tres de los sitios con más alta concentración de mercurio; esto es en la zona cercana a los hornos.

El punto 01_EXPSOL2 en este muestreo, equivale a la muestra 08_EXPSOL1 de la campaña de abril; el punto 02_EXPSOL2 se tomó entre los puntos 15_EXPSOL1 y 16_EXPSOL1; finalmente el punto 03_EXPSOL2 se muestreó entre los puntos 12_EXPSOL1 y 14_EXPSOL1. Así se podrá identificar si hay incremento o disminución de concentración de mercurio en el suelo en temporada de lluvias, respecto a temporada de secas.

Los resultados se muestran en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Resultados muestreo en suelo mina “La Soledad” campaña agosto 2019

Clave	Coordenadas		Altura	pH	Temp. Suelo	[Hg]
	N	W	m.s.n.m.		°C	mg/kg
01_EXPSOL2	21°9.711'	-99°40.625'	2765	ND	29	1976.770
02_EXPSOL2	21.16203°	-99.676954°	2765	ND	15	1112.455
03_EXPSOL2	21.16176°	-99.676914°	2765	ND	26	13472.581

4.2.2 MUESTREO DE AIRE “LA SOLEDAD II”

Para este muestreo se eligieron los sitios con mayor contaminación en el aire, esto es en la bocamina y en la zona de hornos. Para registrar concentraciones tan elevadas, se adaptó una celda especial al equipo LUMEX RA915+, aumentando su nivel de detección hasta los 220,000 ng/m³. El equipo toma mediciones cada 5 segundos por lo cual se registran dos valores, el primer valor [Hg] es la concentración de mercurio al instante de la medición, y el segundo valor [Hg] prom registra la concentración de mercurio promediada desde el encendido del equipo.

Los resultados de mercurio en aire en la bocamina se muestran en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Muestreo de aire en bocamina “La Soledad” agosto 2019

Hora	[Hg]	[Hg] Prom.
12:05	191700	190000
12:08	141300	143600
12:11	164400	148500
12:14	112300	111400
12:17	5000	5000
12:20	16500	15800
12:23	10500	11000
12:26	8780	8775
12:29	71400	70800
12:32	80300	81200
12:35	71700	70300
12:38	65300	62700
12:41	97800	96300
12:44	22700	5828
12:46	82200	12700
12:48	52600	27400
12:50	37400	13100
12:52	55000	52200
12:54	47700	4663
12:56	125000	9381
12:58	35000	21500
13:00	53300	23800
13:01	51500	8089
13:02	114800	25600
13:03	32800	23700

Hora	[Hg]	[Hg] Prom.
13:04	51600	34400
13:05	9493	500
13:06	30800	17300
13:07	32500	41000
13:08	14206	19700
13:09	28200	20000
13:10	18900	8000
13:11	109200	29300
13:12	56700	38600
13:13	78900	19600
13:14	36300	47049
13:15	57000	35900
13:16	39100	21100
13:17	71600	26200
13:18	49000	46500
13:19	99600	26500
13:20	111700	55200
13:21	62900	24900
13:22	40800	12500
13:23	90700	28400
13:24	110800	43500
13:25	127200	28600
13:26	56400	22500
13:27	100800	27900
13:28	203000	38900

Hora	[Hg]	[Hg] Prom.
13:29	111200	45200
13:30	181700	64700
13:31	147500	18700
13:32	191000	23000
13:33	182000	129000
13:34	10350	9576
13:35	10500	10500
13:36	80700	27300
13:37	36600	500
13:38	40600	500
13:39	37700	10300
13:40	99200	42400
13:41	108200	33700
13:42	107500	34600
13:43	113900	16500
13:44	71900	19700
13:45	84300	58900
13:46	126500	28000
13:47	27700	6462
13:48	8100	8558
13:49	7150	5663
13:50	2160	2700
13:51	51300	43300
13:52	220000	35600
13:53	220000	9890

Hora	[Hg]	[Hg] Prom.
13:54	65800	62700
13:55	61500	39800
13:56	210500	4080
13:57	75300	10700
13:58	45700	13700
13:59	4125	45700
14:00	35200	12500
14:01	65200	16000

Hora	[Hg]	[Hg] Prom.
14:02	57700	7337
14:03	15900	2457
14:04	94200	22200
14:05	71500	3745
14:06	77100	1402
14:07	75500	4663
14:08	1605	670
14:09	9105	1360

Hora	[Hg]	[Hg] Prom.
14:10	47000	37200
14:11	23800	10200
14:12	96600	34700
14:13	45100	10300
14:14	11400	11400
14:15	4261	4373

Mínimo: 1,605 ng/m³

1er cuartil: 32,800 ng/m³

Mediana: 57,700 ng/m³

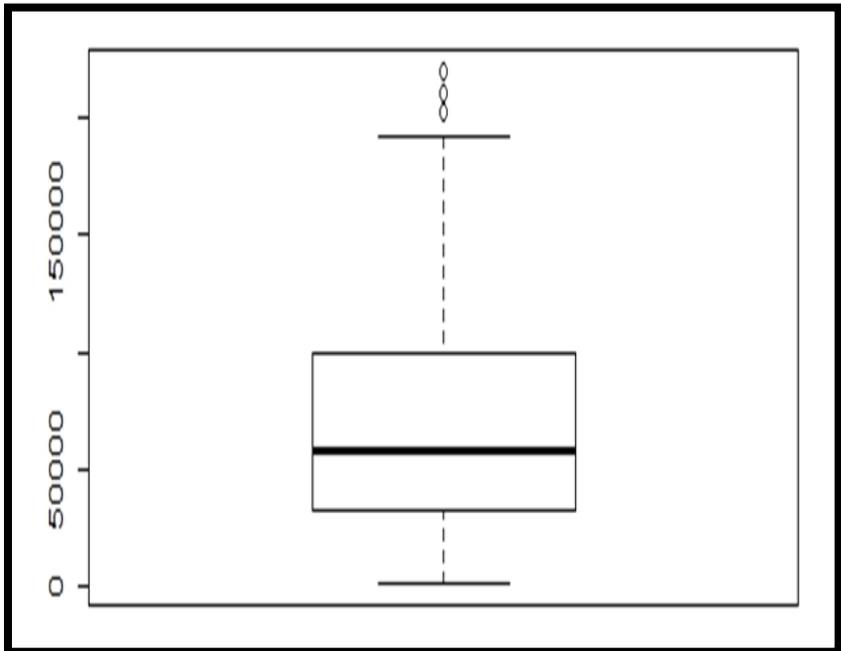
Promedio: 71,198 ng/m³

3er cuartil: 99,600 ng/m³

Máximo: 220,000 ng/m³

Desviación estándar: 54,117.98

Varianza: 2,928,755,740.00



Para el muestreo en la zona de hornos, se colocó el equipo LUMEX RA 915+ en un sitio entre los 3 hornos encendidos y con la celda para altas concentraciones. Con esto, se registraron los siguientes datos, identificando los momentos en los que se alimenta el combustible (leña) a cada horno:

Tabla 4.10. Muestreo de aire en la zona de hornos "La Soledad" agosto 2019.

Hora	[Hg]	Notas
14:18	39200	Leña al horno 2
14:19	42600	-
14:20	52600	-
14:21	55300	-
14:22	58700	-

Hora	[Hg]	Notas
14:23	60200	-
14:24	70900	-
14:25	77600	-
14:26	83100	-
14:27	89200	-
14:28	93600	-

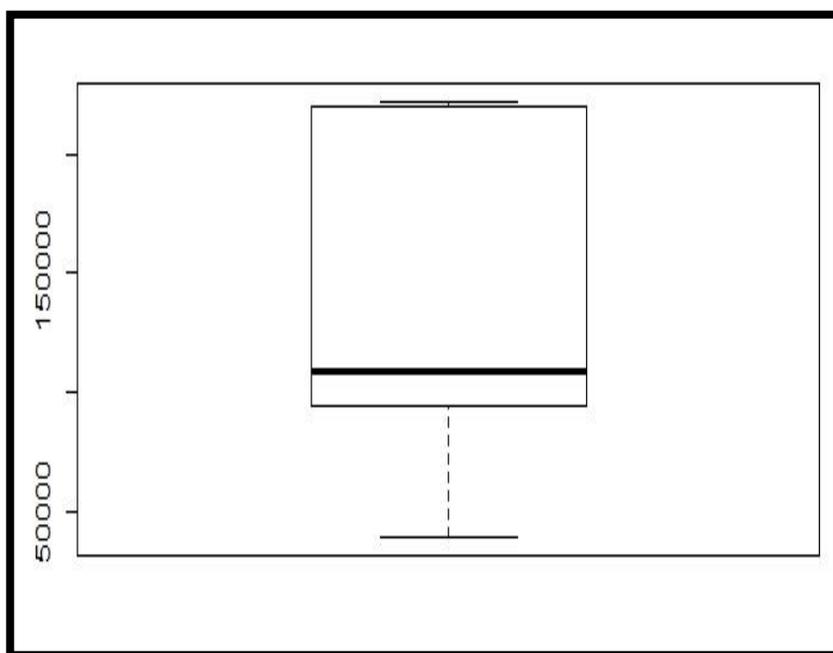
Hora	[Hg]	Notas
14:29	94500	-
14:30	97260	-
14:31	99800	-
14:32	106900	-
14:33	111200	-
14:34	115800	-

Hora	[Hg]	Notas
14:35	102900	-
14:36	106700	-
14:37	109700	Leña al horno 3
14:38	107600	-
14:39	118400	-
14:40	108300	-
14:41	102000	-
14:42	108700	-
14:43	99200	-

Hora	[Hg]	Notas
14:44	116400	Leña al horno 1
14:45	177600	-
14:46	217200	-
14:47	220000	-
14:48	220000	-
14:49	222000	-
14:50	222000	-
14:51	222000	-
14:52	192400	-

Hora	[Hg]	Notas
14:53	199300	-
14:54	220000	-
14:55	220000	-
14:56	220000	-
14:57	220000	-
14:58	220000	-
14:59	220000	-
15:00	220000	Fin muestreo

Mínimo: 39,200 ng/m³
1er cuartil: 94,050 ng/m³
Mediana: 108,700 ng/m³
Promedio: 136,299 ng/m³
3er cuartil: 220,000 ng/m³
Máximo: 220,000 ng/m³
Desviación estándar: 64,270.67
Varianza: 4,130,719,561.00



4.2.3 MUESTREO DE AGUA “LA SOLEDAD II”

En esta campaña, siendo temporada de lluvias, se pudo acceder a los inicios de una corriente temporal de agua que nace en la bocamina de “La Soledad”, el cual va arrastrando mineral residual por todo su trayecto y presenta una coloración gris. Se tomaron 5 muestras de agua superficial, sin embargo, las lecturas en el equipo de absorción atómica acoplado a un generador de hidruros mostraron que la concentración de mercurio estaba por debajo de los límites de detección (véase Anexo II Curvas de calibración). A continuación, en la figura 4.8 se muestra el mapa de los puntos muestreados.



Figura 4.8 Muestreo de agua “La Soledad” agosto 2019

4.2.4 MUESTREO EXPLORATORIO EN SUELO “CAMARGO”

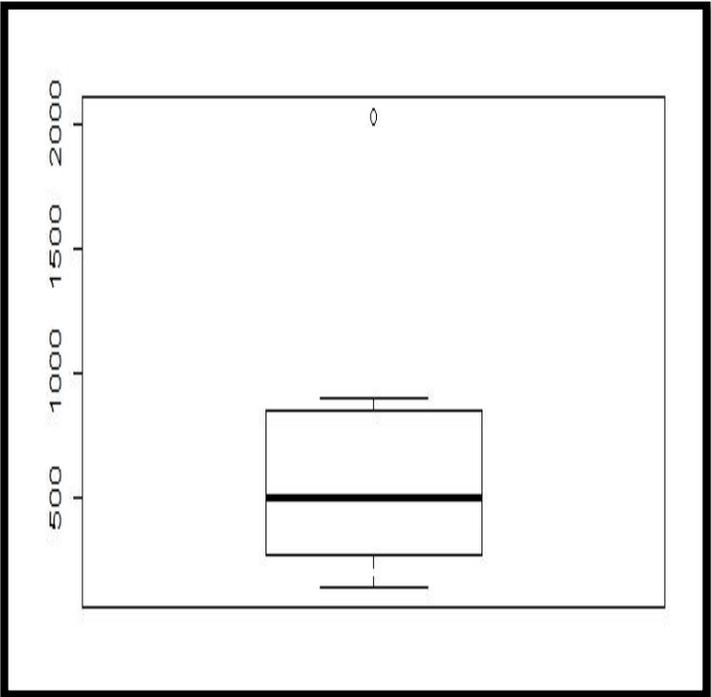
Esta mina, considerada de las más grandes de la región, se encuentra dividida en 4 niveles. En el primer nivel casi a la altura de la carretera, se localiza la bocamina, de donde extraen el cinabrio para procesarlo; más abajo, en el segundo nivel, se ubica una “pila” de jales mineros además de una zona de 4 bloques de hornos, continuando hacia abajo, en el tercer nivel se encuentran 4 bloques de hornos e instalaciones diversas no identificadas, y finalmente en el cuarto nivel, el más bajo, se encuentra la zona principal de explotación en donde más de 20 hornos están encendidos y alimentándose del mineral de manera continua.

En este caso, se tomaron 10 muestras de suelo entre los 4 niveles y los resultados se muestran en la Tabla 4..

Tabla 4.11 Resultados muestreo en mina “Camargo” campaña agosto 2019

Clave	Coordenadas		pH	Temp. Suelo	[Hg]
	N	W		°C	mg/kg
01_EXPCAM	21°6.139'	-99°43.235'	ND	24	577.477
02_EXPCAM	21°6.162'	-99°43.241'	ND	22	418.921
03_EXPCAM	21°6.186'	-99°43.241'	ND	21	185.984
04_EXPCAM	21°6.285'	-99°43.225'	ND	25	135.722
05_EXPCAM	21°6.402'	-99°43.205'	ND	32	851.520
06_EXPCAM	21°6.412'	-99°43.154'	ND	30	895.091
07_EXPCAM	21°6.425'	-99°43.154'	ND	24	2033.147
08_EXPCAM	21°6.434'	-99°43.144'	ND	31	267.629
09_EXPCAM	21°6.477'	-99°43.164'	ND	25	686.076
10_EXPCAM	21°6.486'	-99°43.186'	ND	25	303.693

Mínimo: 135.72 mg/kg
1er cuartil: 276.60 mg/kg
Mediana: 498.20 mg/kg
Promedio: 635.50 mg/kg
3er cuartil: 810.20 mg/kg
Máximo: 2033.15 mg/kg
Desviación estándar: 559.52
Varianza: 313,063.20



La ubicación de los puntos se muestra en la figura 4.9.



Figura 4.9 Mapa de ubicación de puntos muestreados en suelo "Camargo" agosto 2019

4.2.5 MUESTREO EXPLORATORIO EN AIRE “CAMARGO”

Para este muestreo, debido a la gran extensión del terreno, se realizaron dos rutas. Una ruta comenzando desde el punto más bajo, donde se encuentra la zona de hornos encendidos más grande, hasta llegar a la bocamina a nivel de la carretera.

Los datos obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 4.12 Resultados del monitoreo en aire en la ruta 1 “Camargo”

Nombre	Coordenadas		Distancia al punto de emisión (Δx) m	Altura m	ΔH m	[Hg] ng/m3	Descripción
	N	W					
CAM_PX00	21°6.196'	99°43.232'	34.39	1853	-82	51,900	Entrada camino a mina
CAM_PX01	21°6.214'	99°43.242'	68.65	1855	-80	46,800	Camino a mina
CAM_PX02	21°6.250'	99°43.233'	133.94	1861	-74	27,200	Mitad de camino
CAM_PX03	21°6.311'	99°43.232'	245.97	1874	-61	23,000	Terracería
CAM_PX04	21°6.391'	99°43.218'	394.77	1912	-23	21,400	Terracería con jales
CAM_PX05	21°6.364'	99°43.154'	402.7	1916	-19	17,800	Subida por terracería
CAM_PX06	21°6.421'	99°43.156'	473.19	1919	-16	16,700	Terracería
CAM_PX07	21°6.456'	99°43.179'	523.92	1920	-15	13,500	Montaña de jales

Mínimo: 13,500 ng/m³

1er cuartil: 17,525 ng/m³

Mediana: 22,200 ng/m³

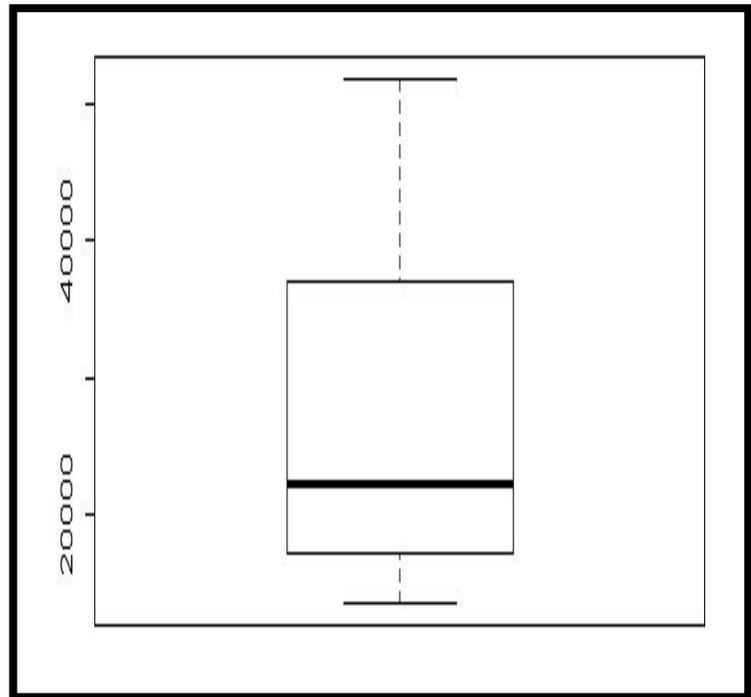
Promedio: 27,288 ng/m³

3er cuartil: 32,100 ng/m³

Máximo: 51,900 ng/m³

Desviación estándar: 14,301.69

Varianza: 204,538,393.00



El mapa que se muestra en la figura 4.10, contiene los datos de la primera ruta.

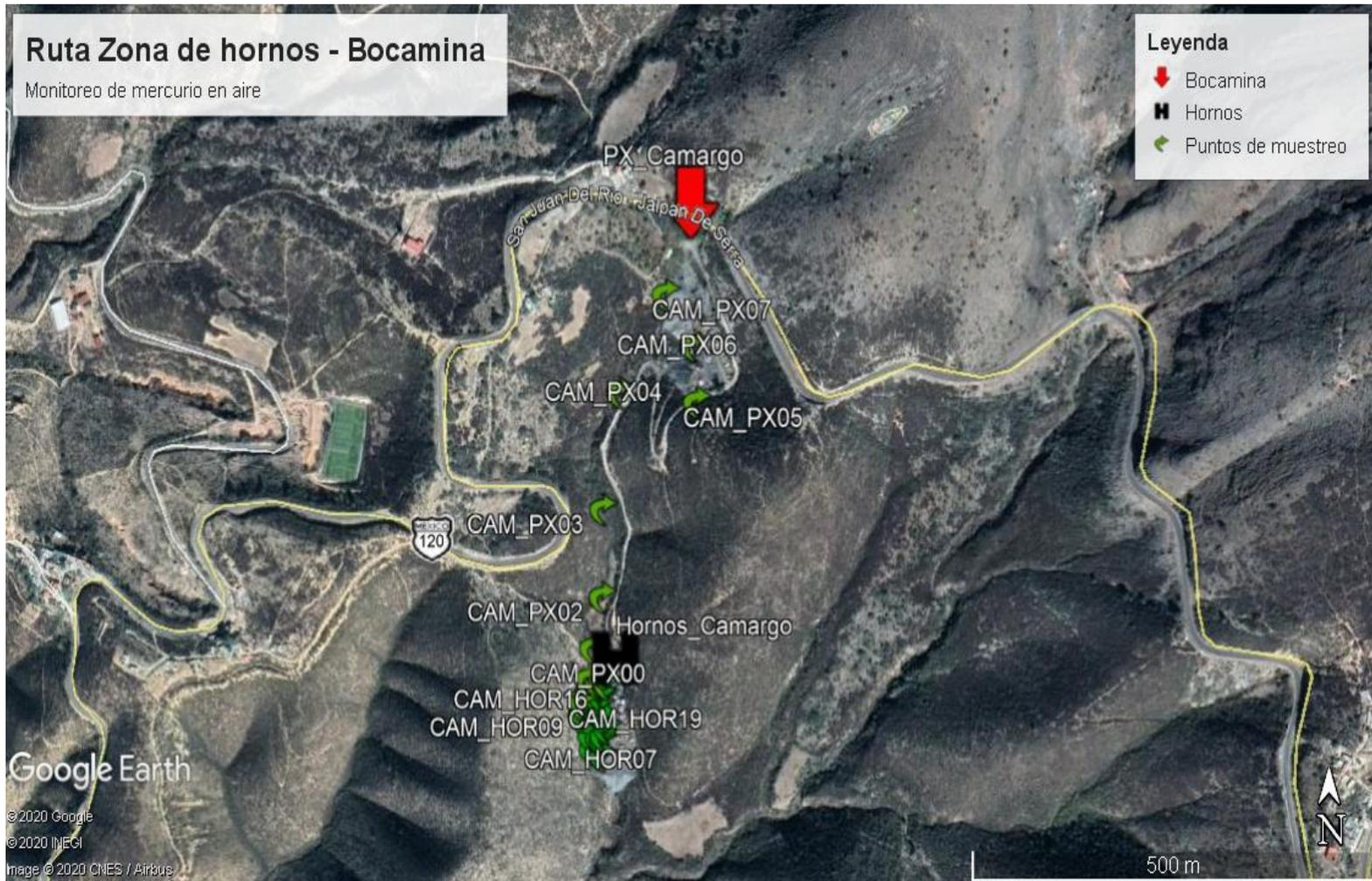


Figura 4.10 Muestreo de aire mina "Camargo" zona de hornos-bocamina, agosto 2019

A continuación, se midió la concentración en la zona de hornos únicamente, abarcando así la zona de explotación del cinabrio, considerando los hornos que se encontraban encendidos y los que estaban apagados.

Los resultados son los siguientes:

Tabla 4.13 Resultados del monitoreo en aire en la ruta 2"Camargo"

Nombre	Coordenadas		Distancia al punto de emisión (Δx)	Altura	ΔH	[Hg]	Descripción
	N	W					
CAM_ESC	21°6.137'	99°43.234'	76.86	1839	-96	326	Montaña de Escoria
CAM_HOR01	21°6.147'	99°43.234'	56.27	1841	-94	300	Horno Abandonado 1
CAM_TUBO	21°6.151'	99°43.233'	49.96	1841	-94	988	Tubo Horno Abandonado 2
CAM_HOR02	21°6.150'	99°43.232'	52.01	1841	-94	564	Horno Abandonado 2
CAM_HOR03	21°6.149'	99°43.237'	53.18	1841	-94	1,168	Horno Cargado 3
CAM_HOR04	21°6.142'	99°43.243'	68.6	1840	-95	303	Horno Cargado 4
CAM_HOR05	21°6.152'	99°43.244'	51.61	1841	-94	4,222	Horno Cargado 5
CAM_HOR06	21°6.164'	99°43.233'	25.47	1842	-93	6,097	Horno Cargado 6
CAM_HOR07	21°6.157'	99°43.230'	39.36	1842	-93	8,309	Horno Cargado 7
CAM_HOR08	21°6.165'	99°43.252'	38.93	1842	-93	3,217	Horno Cargado 8
CAM_HOR09	21°6.169'	99°43.251'	33.62	1843	-92	5,133	Horno Cargado 9
CAM_HOR10	21°6.169'	99°43.240'	19.33	1843	-92	2,588	Horno Vacío 10

Nombre	Coordenadas		Distancia al punto de emisión (Δx)	Altura	ΔH	[Hg]	Descripción
	N	W					
CAM_HOR11	21°6.172'	99°43.236'	11.24	1844	-91	1,032	Horno Cargado 11
CAM_HOR12	21°6.177'	99°43.237'	0	1844	-91	2,273	Horno Encendido 12
CAM_HOR13	21°6.179'	99°43.235'	0	1844	-91	4,261	Horno Encendido 13
CAM_HOR14	21°6.182'	99°43.239'	10.7	1845	-90	6,169	Horno Apagado 14
CAM_HOR15	21°6.187'	99°43.278'	19.01	1846	-89	11,100	Horno Apagado 15
CAM_HOR16	21°6.188'	99°43.230'	19.76	1846	-89	17,300	Horno Apagado 16
CAM_HOR17	21°6.181'	99°43.247'	0	1848	-87	129,700	Horno Encendido 17
CAM_HOR18	21°6.178'	99°43.250'	7.6	1848	-87	108,500	Horno Apagado 18
CAM_HOR19	21°6.174'	99°43.252'	0	1848	-87	87,500	Horno Encendido 19
CAM_HOR20	21°6.192'	99°43.246'	26.78	1849	-86	78,700	Horno Apagado 20

Mínimo: 300 ng/m³

1er cuartil: 1,066 ng/m³

Mediana: 4,242 ng/m³

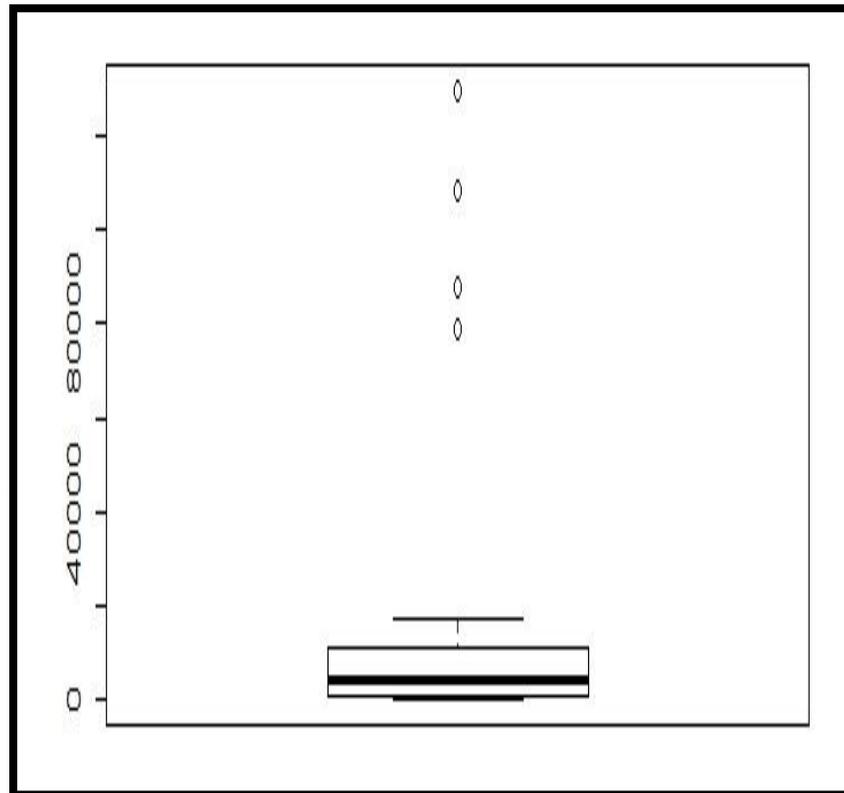
Promedio: 21,807 ng/m³

3er cuartil: 10,402 ng/m³

Máximo: 129,700 ng/m³

Desviación estándar: 39,423.09

Varianza: 1,554,180,117.00



Los puntos muestreados se pueden observar en la figura 4.11:

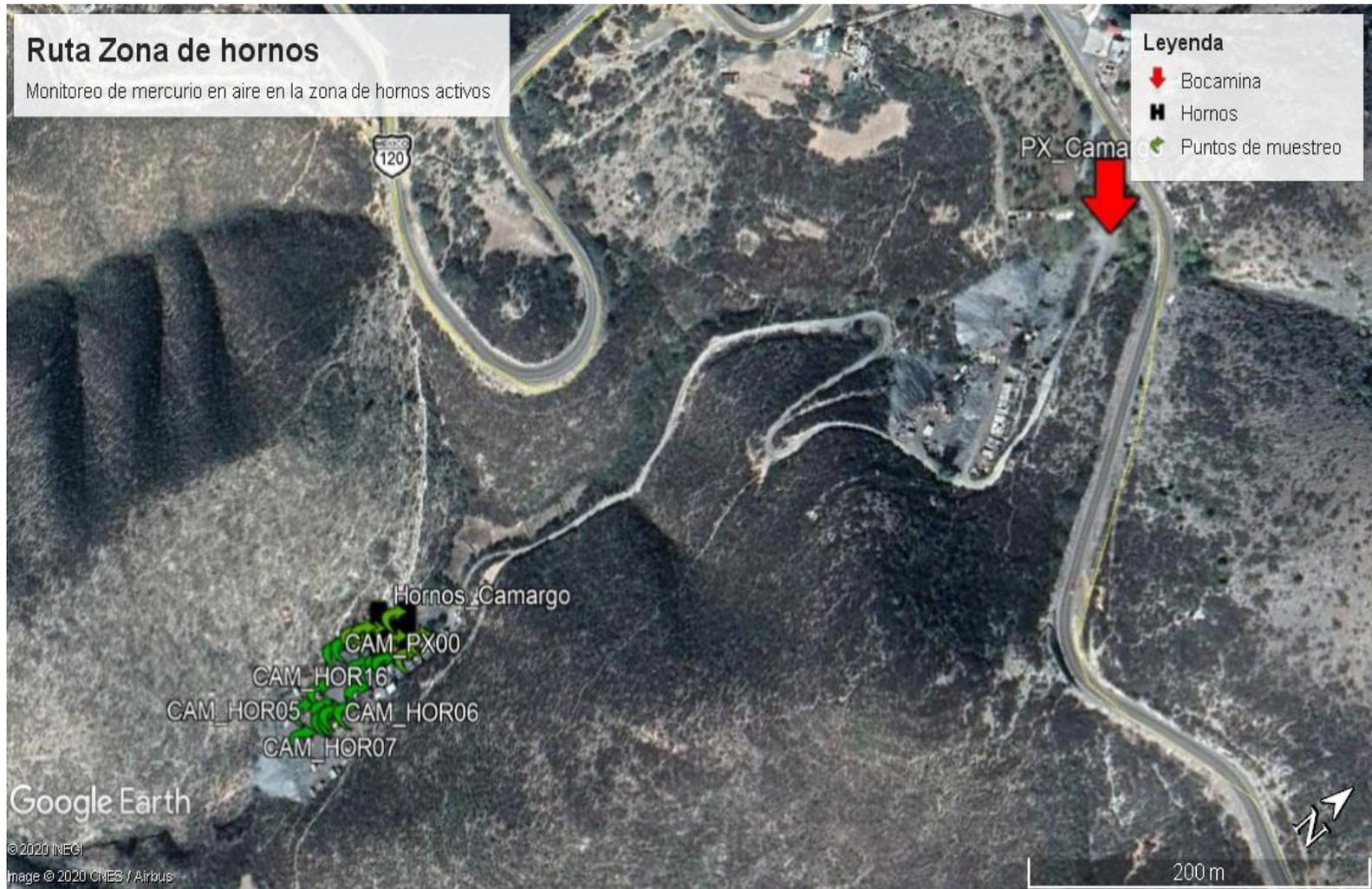


Figura 4.11 Muestreo de aire mina “Camargo” zona de hornos, agosto 2019

4.2.6 MUESTREO DE FONDO EN SUELO “PUERTA DEL CIELO II”

Al igual que en los muestreos de la mina “La Soledad”, en la primera campaña se obtuvieron resultados de fondo, en este sitio, por lo que, para comparar la concentración por temporadas, se tomó una muestra en el sitio con más alta concentración de mercurio con base en los resultados de abril. En esta ocasión los resultados se muestran en la tabla 4.14.

Tabla 4.14 Concentración de mercurio en suelo “Puerta del Cielo” agosto, 2019

Clave	Coordenadas		Altura	pH	Temp. Suelo	[Hg]
	N	W	msnm		°C	mg/kg
01_FONCIE2	21°7.103'	-99°37.639'	2625	ND	19	55.061

Por lo cual, a las muestras tomadas en “La Soledad” en agosto, como parte de la segunda campaña, se les resta la concentración de fondo, dejando los siguientes resultados en la tabla 4.15.

Tabla 4.15 Concentración final de muestras mina “La Soledad” campaña agosto 2019

Clave	[Hg]	[Hg]-fondo
	mg/kg	mg/kg
01_EXPSOL2	1976.770	1920.276
02_EXPSOL2	1112.455	1055.961
03_EXPSOL2	13472.581	13416.087

4.2.7 MUESTREO DE FONDO EN AIRE “PUERTA DEL CIELO II”

Finalmente, como último muestreo de la campaña, se realizó el muestreo de fondo en aire, en el mismo sitio que se llevó a cabo en la primera campaña “Puerta del Cielo”.

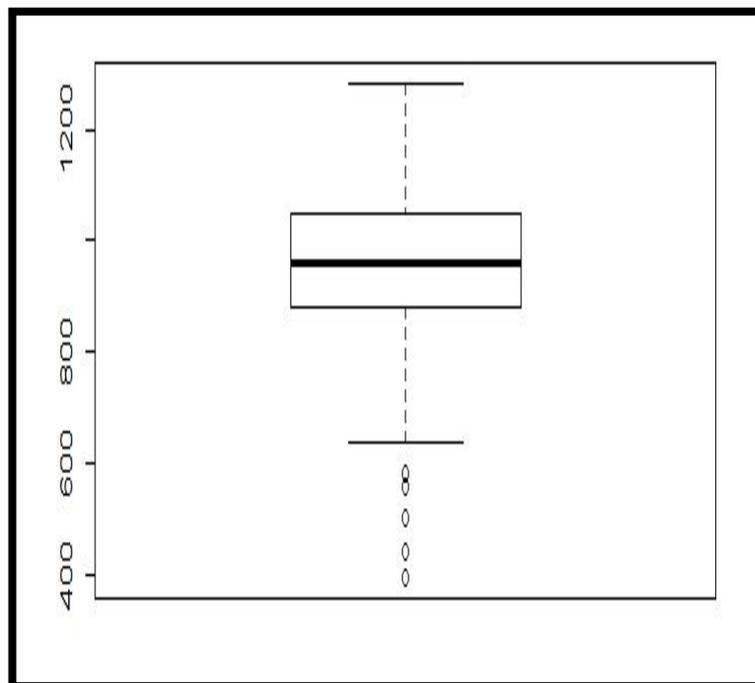
Los resultados se encuentran en la tabla 4.16.

Tabla 4.16 Muestreo de fondo en aire “Puerta del Cielo” campaña agosto 2019

Hora	Temp. Amb.	Vel. Viento	Direc. Viento	[Hg]
	°C	m/s	°	ng/m3
10:22	14.5	0.4	225	394
10:25	14.7	0.4	270	441
10:28	14.8	1.8	270	502
10:31	14.9	1.8	315	557
10:34	14.9	0.9	270	580
10:37	15	0.4	270	637
10:40	15.1	0.4	270	676
10:43	15.3	0	315	743
10:46	15.3	0.4	270	749
10:49	15.2	0.4	270	757
10:52	15.1	0.4	225	754
10:55	15	0	270	758
10:58	15.1	0.9	225	790
11:01	15.1	0.4	225	819
11:04	15.2	0.4	180	881
11:07	15.3	0.7	225	907
11:10	15.5	0.4	270	931
11:13	15.8	1.3	315	932
11:16	16.1	0.4	315	931
11:19	16.3	0.4	315	934
11:22	16.6	1.8	315	930
11:25	16.4	0.9	180	930
11:28	16.3	0.4	225	932
11:31	16.3	0	270	943
11:34	16.6	0.9	180	952
11:37	16.8	1.3	180	955
11:40	16.8	0.4	315	965
11:43	17	0.9	270	959
11:46	16.9	0.4	270	967
11:49	16.9	0.9	225	959
11:52	16.9	0.4	225	966

Hora	Temp. Amb.	Vel. Viento	Direc. Viento	[Hg]
	°C	m/s	°	ng/m3
11:55	17.2	0.4	225	966
11:58	17.3	2.2	315	951
12:01	17.4	1.8	225	936
12:04	17.5	0.4	225	971
12:07	17.7	0	315	993
12:10	18.2	0.4	315	1008
12:13	18.2	0	315	1005
12:16	18.3	0.9	180	1041
12:19	18.5	0	225	1048
12:22	18.3	0.9	315	1062
12:25	18.3	3.5	315	1046
12:28	18.2	2.2	0	1050
12:31	18.3	1.8	225	1051
12:34	18.2	0.4	225	1083
12:37	18.1	0.4	180	1102
12:40	18.1	0.9	180	1007
12:43	18.2	0.9	270	1001
12:46	18.4	0	225	1139
12:49	18.7	0	270	1167
12:52	19	0.9	270	1101
12:55	19.2	0.9	270	1172
12:58	19.1	0.4	0	1211
13:01	19	0.4	270	1229
13:04	19.2	0.4	0	1230
13:07	19.2	1.8	225	1256
13:10	19	0.9	315	1264
13:13	19	1.3	180	1283

Mínimo: 394.00 ng/m³
1er cuartil: 887.50 ng/m³
Mediana: 959.00 ng/m³
Promedio: 939.70 ng/m³
3er cuartil: 1049.50 ng/m³
Máximo: 1,283.00 ng/m³
Desviación estándar: 199.73
Varianza: 39,890.80



4.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

En el muestreo de abril en "La Soledad", once de las dieciséis muestras de suelo superaron los LMP establecidos en la normatividad mexicana para suelo de uso industrial (310 mg/kg).

En la Figura 4.12 se aprecian los valores de cada muestra teniendo el mínimo en 16 mg/kg y el máximo en 857 mg/kg, con un promedio de 425.68 mg/kg.

Considerando que las muestras van en orden creciente, de acuerdo con su distancia respecto a la mina, la tendencia marca un incremento considerable de mercurio conforme se aproxima a la zona de explotación. Otro detalle por considerar es que la contaminación en la zona donde inicia el acceso a la mina no sobrepasa los niveles permitidos, registrando concentraciones de hasta 10 veces menor a los límites establecidos, esto es atribuible a que, al ser un terreno en pendiente, el mercurio en suelo en la parte más elevada que corresponde al acceso a la mina puede movilizarse hacia abajo por corrientes de aire o escurrimientos de agua.

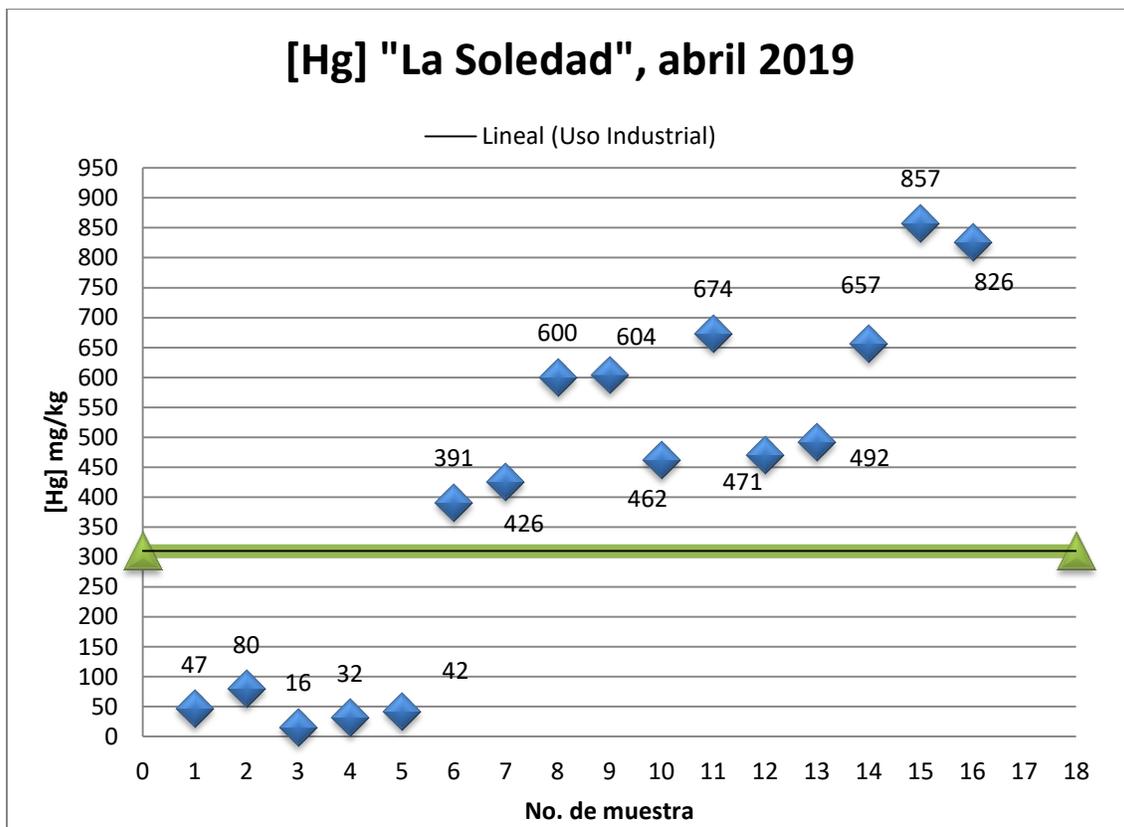


Figura 4.12 Muestras de suelo por encima del LMP "La Soledad" abril 2019

Para la parte del muestreo en aire, en la Ruta 1 que va de la carretera a donde inicia la población, se tienen lecturas de concentración de mercurio vapor por debajo del límite recomendado por la OMS (1000 ng/m³), teniendo el valor mínimo en 111 ng/m³ y el valor máximo en 192 ng/m³, y un promedio de 192 ng/m³.

Como se puede apreciar en la figura 4.13, no existe una tendencia clara en los resultados, sin embargo, las concentraciones de mercurio van decreciendo conforme uno se aleja de la mina, ya que los hornos apenas van alimentándose de cinabrio y no se alcanza una dispersión alta de manera inmediata.

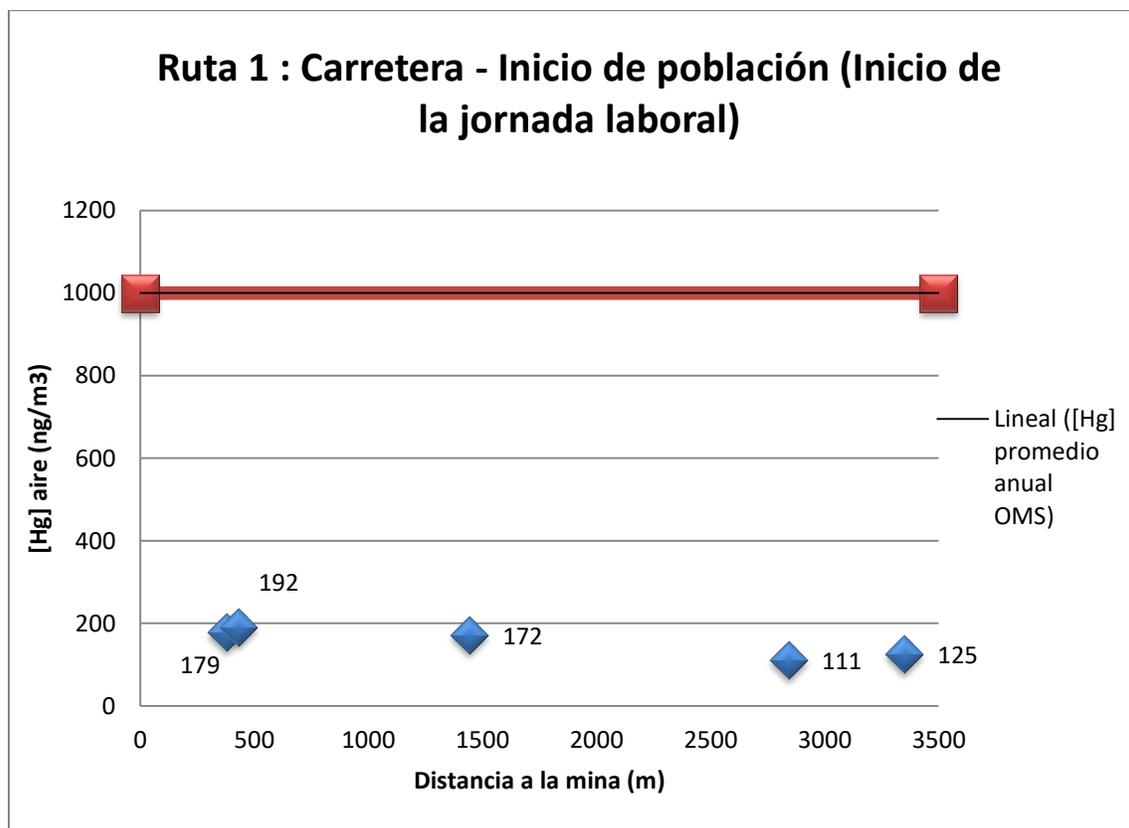


Figura 4.13 Ruta 1 monitoreo de aire "La Soledad" abril 2019

En la Ruta 2 que inicia en la bocamina y corre hasta donde inicia la población, 13 de los 17 puntos monitoreados rebasan la concentración de referencia de 1000 ng/m³, el valor mínimo es de 513 ng/m³ y el máximo de 7925 ng/m³, con un promedio de 2,399 ng/m³.

Aunque no se aprecia una tendencia clara, los valores más altos se encuentran en puntos cercanos a la mina y comienza a descender conforme se alejan del sitio. Hay que considerar que la exposición de los mineros al vapor de mercurio es elevada, considerando su jornada laboral que dura 8 horas.

Esta ruta muestra las concentraciones más elevadas debido a su cercanía a la mina y a que las mediciones se realizaron durante el transcurso de la jornada laboral.

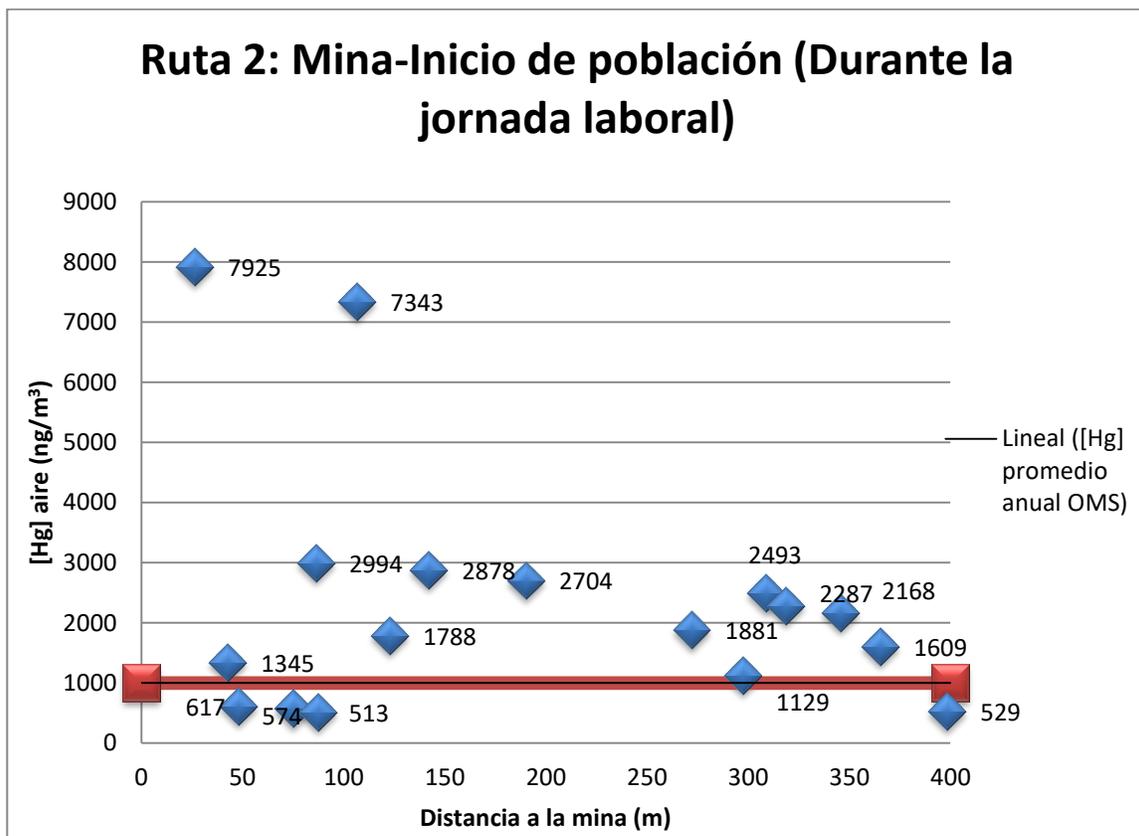


Figura 4.14 Ruta 2 monitoreo de aire "La Soledad" abril 2019

La Ruta 3 realizada una vez terminada la jornada laboral, yendo del inicio de la población hacia la carretera tiene como valor mínimo de 66 ng/m^3 a una distancia de 433 m de la mina, el valor máximo es de 647 ng/m^3 , teniendo un promedio de 355 ng/m^3 .

Aquí se puede apreciar una tendencia donde la concentración de mercurio en el aire aumenta conforme se aleja de la mina. Tomando en cuenta que las mediciones fueron registradas después de que terminó la jornada laboral, estos resultados se pueden adjudicar a diversas causas como:

- Considerando la movilidad del mercurio en el ambiente, su dispersión alcanza grandes distancias; o
- Debido a que algunos mineros reciben como pago, mineral cinabrio, pueden explotarlo en sus casas en las zonas aledañas a la mina, posterior al terminar su jornada laboral.

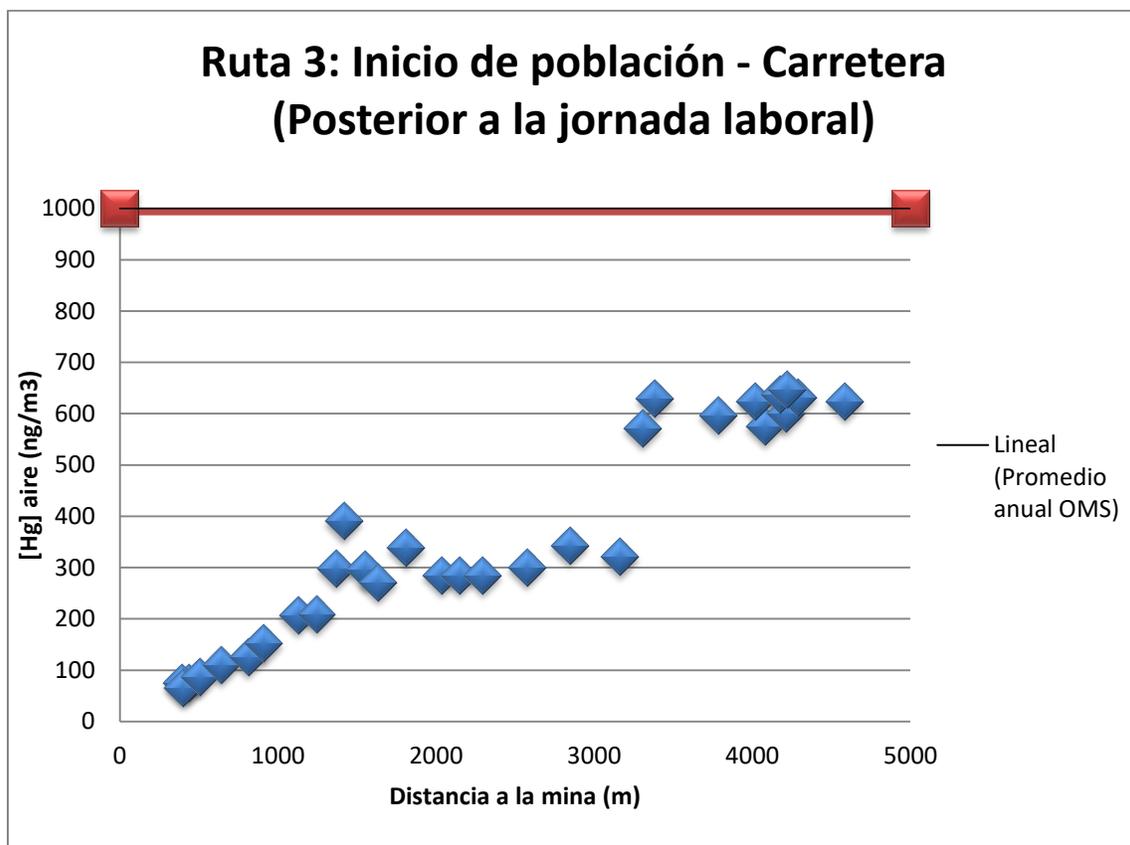


Figura 4.15 Ruta 3 Monitoreo de aire "La Soledad" abril 2019

La meteorología del sitio fue registrada, con temperaturas entre los 14°C y los 21°C, con un promedio de 17.3°C, velocidad de viento promedio de 4.05 m/s y máxima en 13.4 m/s y una humedad promedio de 41.7%.

En el siguiente mapa (Figura 4.16) se puede apreciar una rosa de los vientos y las poblaciones cercanas que se pueden ver afectadas, en este caso comunidades como las de San Gaspar que se encuentra a 1.1 km de la mina, Agua Enterrada (a 6.1 km de la mina), El Cantón (a 7.8 km de la mina) o Río Blanco (a 8.3 km de la mina), pueden recibir las emisiones de la mina “La Soledad”.

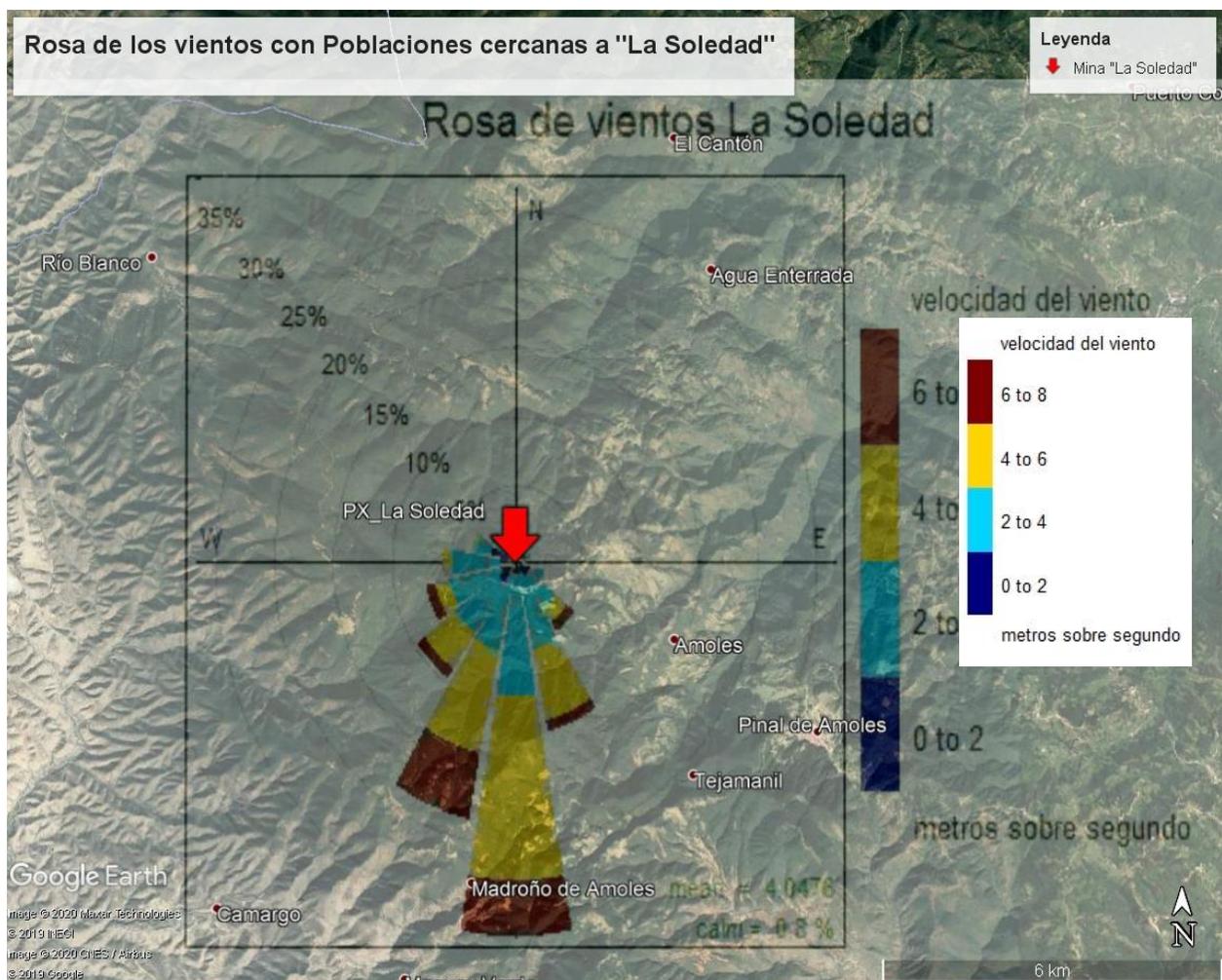


Figura 4.16. Mapa de poblaciones cercanas a "La Soledad"

En el sitio de fondo "Puerta del Cielo" en la campaña de abril, de las 6 muestras tomadas en el suelo, ninguna rebasa el LMP para suelo con uso agrícola/residencial/comercial que es de 23 mg/kg, el valor mínimo se encuentra en los 2 mg/kg y el máximo en los 17 mg/kg, con un promedio de 8.34 mg/kg.

En la zona se presenta un bosque protegido, en el cual hay algunas semillas como el piñón, que únicamente se dan en temporadas de heladas.

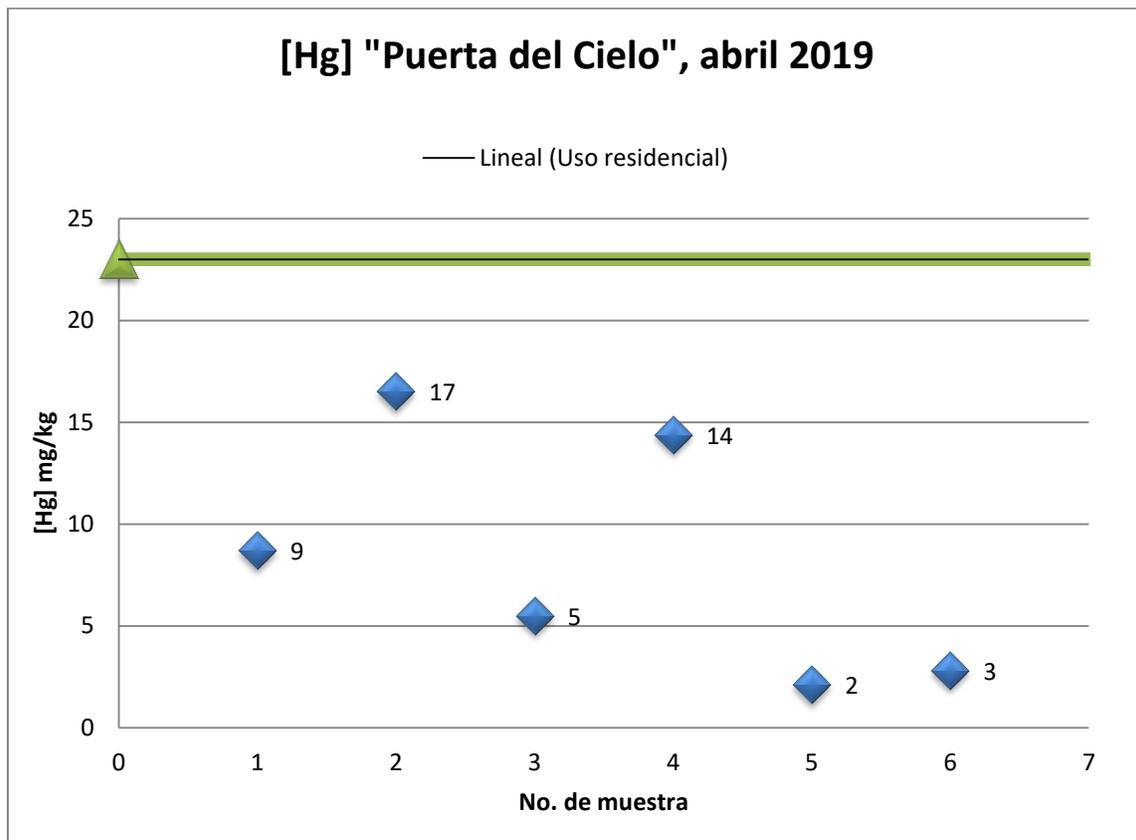


Figura 4.17 Muestras de suelo "Puerta del Cielo" abril 2019

En cuanto a mediciones en el aire, la concentración máxima registrada fue de 181 ng/m³, bajando hasta los 76 ng/m³ y después estabilizándose en 106 ng/m³ \pm 3 ng/m³ después de medio día, dando una concentración promedio de 111.7 ng/m³ de vapor de mercurio.

Ningún valor rebasa el límite recomendad por la OMS de 1000 ng/m³, sin embargo, se debe considerar que, debido a la explotación casera del mercurio, puede haber puntos de emisión cercanos a la zona que no estén identificados.

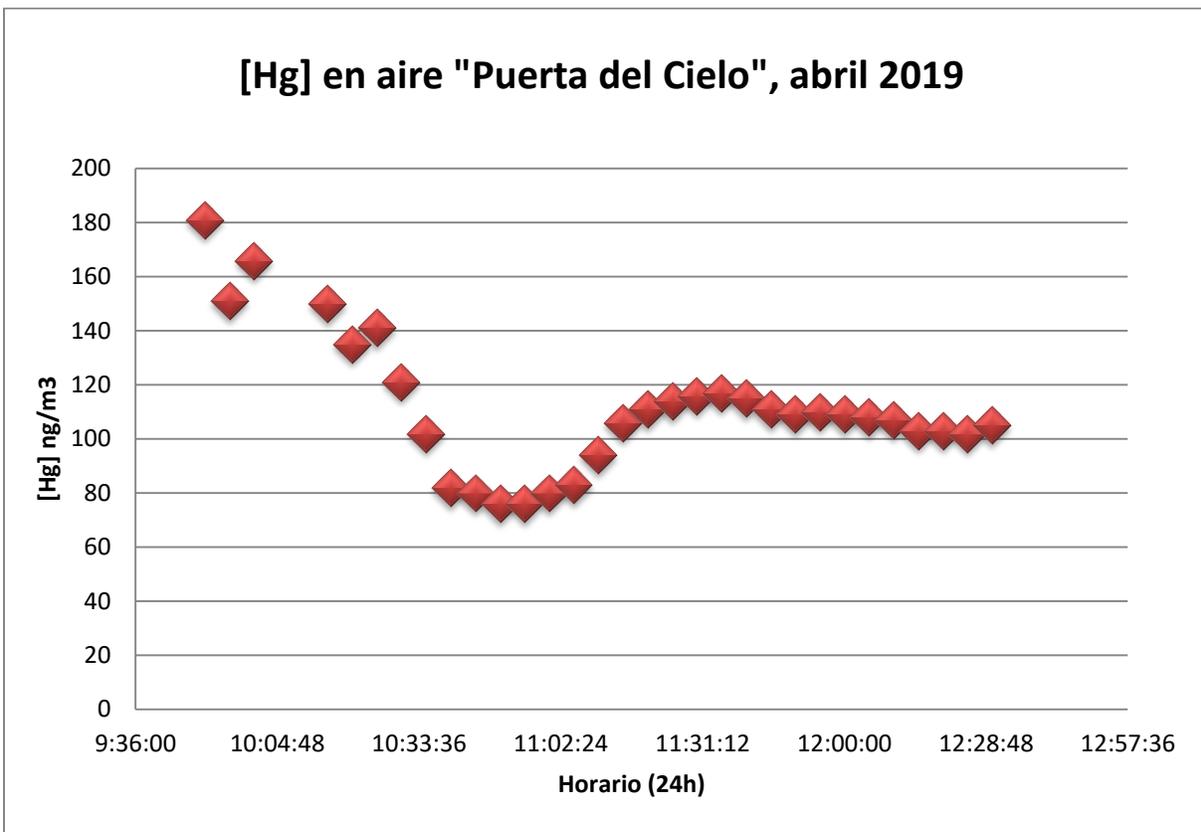


Figura 4.18 Monitoreo de aire "Puerta del Cielo" abril 2019

La meteorología en “Puerta del Cielo” se registró como se muestra en la Figura 4.19, la temperatura osciló entre los 17°C y los 21°C con un promedio de 18.4°C, con velocidad de viento promedio de 5.1 m/s y máxima de 12.5 m/s.

Las poblaciones más cercanas hacia donde el viento arrastra los contaminantes son Madroño de Amoles (a 6 km), El Limón (a 7 km), Huasquillo (a 7.2 km), Maguey Verde (a 7.4 km), El Sotol (a 9.3 km), Bucareli (a 10 km) y Camargo (a 10.5 km).

La selección de este lugar como sitio de fondo, se puede apreciar como adecuada debido a que presenta características físicas similares y no registra vientos a favor provenientes de “La Soledad”.

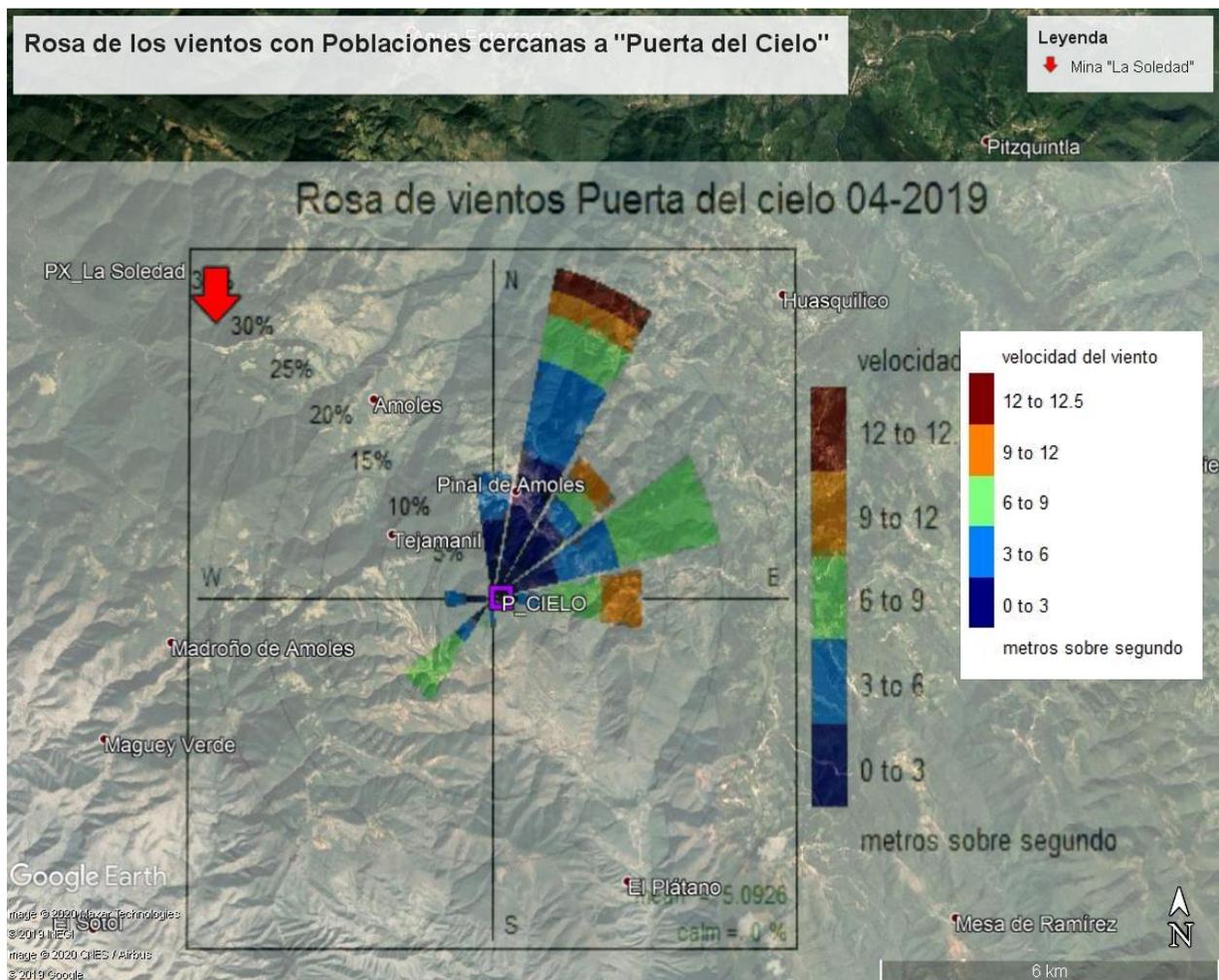


Figura 4.19 Mapa de poblaciones cercanas a “Puerta del Cielo”

Para la segunda campaña, en el muestreo de suelo, las 3 muestras tomadas rebasan el LMP de la normatividad mexicana (310 mg/kg) en gran proporción.

Recordando en que la clave 00_EXPSOL1 los primeros dos dígitos hacen referencia al número de la muestra, la clave EXP es para muestreos exploratorios, FON para muestreos de fondo, SOL para la mina de “La Soledad” y CAM para la mina de “Camargo” y el último dígito particularmente para la mina La Soledad hace referencia 1, al muestreo de abril y 2 al muestreo de agosto, se puede hacer el siguiente análisis:

Como primer punto, se tiene la comparación de resultados en la mina “La Soledad” para la temporada de secas en abril, contra la temporada de lluvias en agosto.

Las muestras 08_EXPSOL1 es equivalente a la muestra 01_EXPSOL2; las muestras 15_EXPSOL1 y 16_EXPSOL2 son equivalentes a la muestra 02_EXPSOL2; y finalmente las muestras 12_EXPSOL1 y 14_EXPSOL1 son equivalentes a la muestra 03_EXPSOL2. Todo esto debido a su ubicación, en el caso de las muestras HORNO_EXPSOL1 y HORNO_EXPSOL2, se hará un análisis especial más adelante. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.17.

Tabla 4.17 Comparación por temporadas de concentración de mercurio en suelo

Comparación ABRIL-AGOSTO			
	Clave	[Hg] mg/kg	Promedio
1	08_EXPSOL1	600.306	-
	01_EXPSOL2	1920.276	-
2	15_EXPSOL1	857.499	841.598
	16_EXPSOL1	825.698	
	02_EXPSOL2	1055.961	-
3	12_EXPSOL1	471.076	564.129
	14_EXPSOL1	657.183	
	03_EXPSOL2	13416.087	
4	HORNO_EXPSOL1	9.416	-
	HORNO_EXPSOL2	224.774	-

En los 3 casos, hay un incremento de concentración de mercurio en suelo en la temporada de lluvias respecto a la temporada de secas. Para apreciar la magnitud del aumento se muestra la figura 4.21.

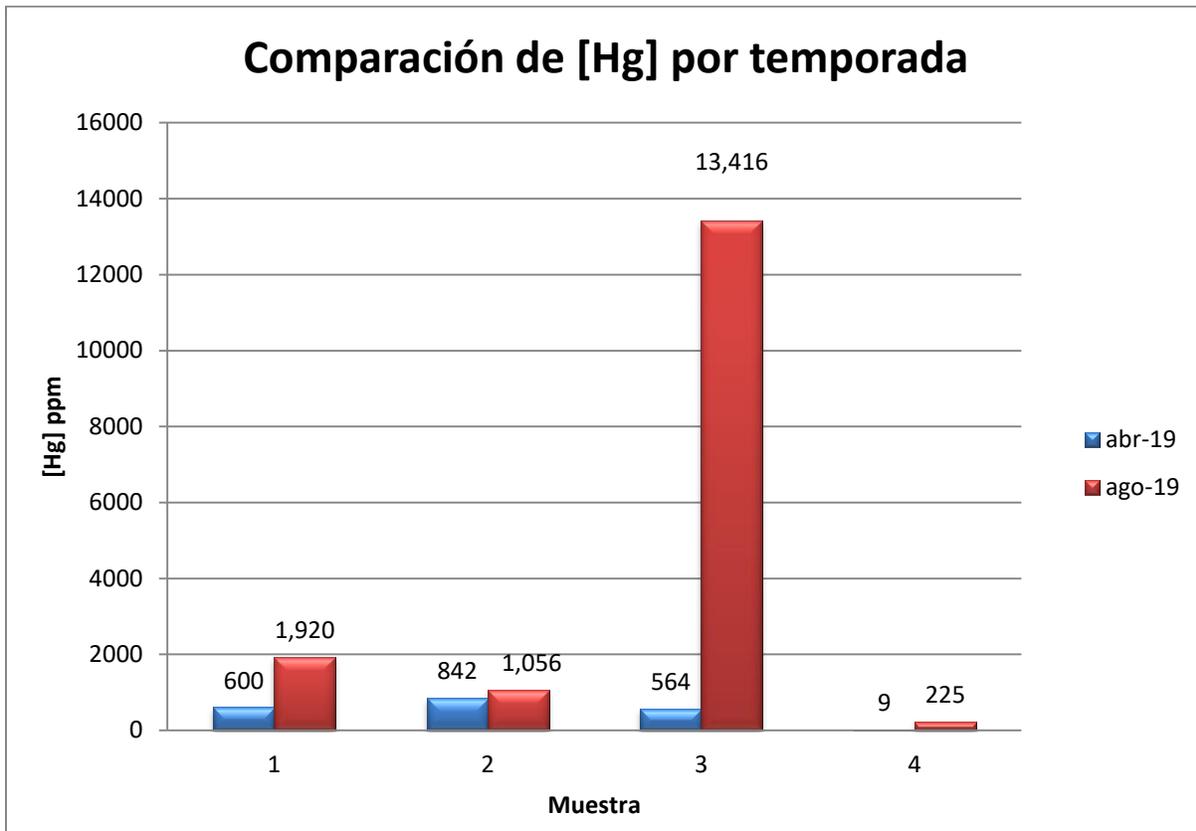


Figura 4.20 Comparación de concentración de mercurio en suelo por temporada

En el primer caso, la muestra 01_EXPSOL2 tiene una concentración de 1920.28 mg/kg lo cual equivale a un aumento de [Hg] de un 220%, en ambos casos se supera el LMP establecido por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para suelos de uso industrial (310 mg/kg).

En el segundo caso, se promedió la concentración de las muestras 15 y 16 del primer muestreo y se comparó con la segunda muestra de la segunda campaña. Aquí el aumento de concentración para la muestra en temporada de lluvias fue del 25% respecto a la temporada de secas.

Para la tercera comparación, se promedió la concentración de las muestras 12 y 14 de la campaña de abril contra la tercera muestra de la campaña de agosto. Este caso es el más delicado ya que la concentración de mercurio aumentó casi 2300%.

La gran diferencia entre la operación de la mina en abril de 2019 y agosto de 2019 es que, en temporada de lluvias, la producción aumentó debido a un incremento en el precio del mercurio comercializado de manera ilegal.

En el caso del muestreo de aire en esta segunda campaña, en “La Soledad”, no es posible realizar una comparación, ya que los objetivos fueron diferentes. En la campaña de abril, se logró trazar 3 rutas a lo largo del día para observar la dispersión del mercurio en el aire; sin embargo, para la segunda campaña, el objetivo fue cambiado para cuantificar las concentraciones de mercurio a las que están expuestas los mineros en las instalaciones, ya que la accesibilidad fue menor, debido a la explotación continua del cinabrio.

Para la campaña de agosto, se debe tener en cuenta que la jornada laboral del minero, debido a la demanda del metal, es de turnos de 24 horas por minero.

La OSHA recomienda una exposición en trabajadores de 0.1 mg/m^3 8 horas-peso promedio. Los datos de los muestreos registran la exposición mínima de cada trabajador en 39.2 mg/m^3 durante 24 horas y la exposición máxima es de 220 mg/m^3 promedio 24 horas; esto es casi 400 a más de 2000 veces la dosis recomendada.

Las lecturas de concentración de mercurio vapor en la bocamina se muestran en la siguiente figura. Aún el valor mínimo ($1,605 \text{ ng/m}^3$) está por encima del límite recomendado y en algunos momentos alcanzó el límite de detección del equipo de $220,000 \text{ ng/m}^3$.

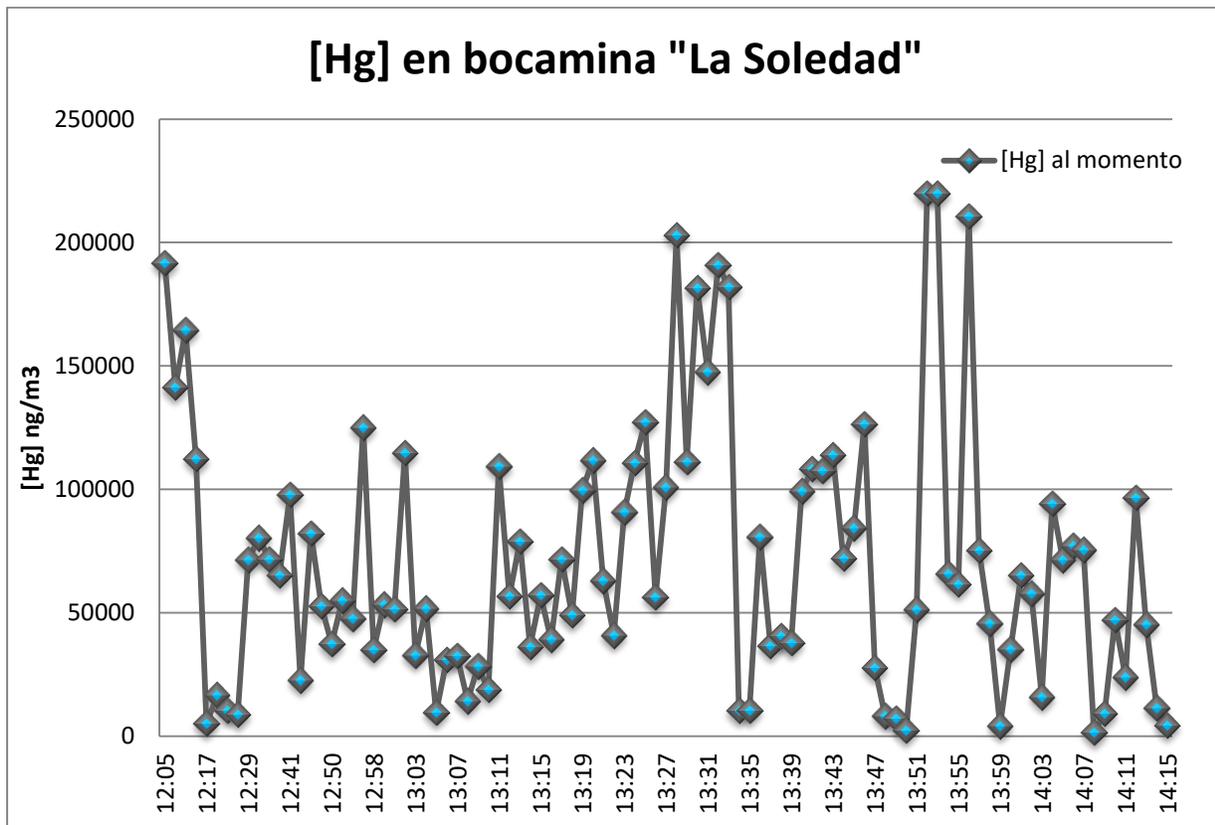


Figura 4.21 Concentración de mercurio en bocamina "La Soledad"

Además, las lecturas de mercurio en la zona de hornos fueron más altas que en la bocamina, llegando durante más tiempo a los límites de detección del equipo (220,000 ng/m³).

En la siguiente figura se puede apreciar la variación del mercurio en vapor, señalando los puntos rojos como los momentos en los que se agregaba más leña a los hornos.

En el primer punto, se añade leña a uno de los 3 hornos y comienza la evaporación del mercurio en los hornos. La concentración de mercurio vapor incrementa gradualmente hasta posteriormente estabilizar un poco la emisión de vapores en aproximadamente 18 minutos; es ahí cuando se alimenta leña al siguiente horno.

Al cabo de aproximadamente 15 minutos se añade leña al tercer horno faltante y con esto la concentración sube radicalmente hasta llegar al límite de detección del equipo. Esto significa que la concentración de mercurio vapor es de al menos 220,000 ng/m³ pero no se puede

determinar hasta qué valor sigue creciendo la concentración, para esto se necesitaría el uso de un equipo con mayor intervalo de mediciones.

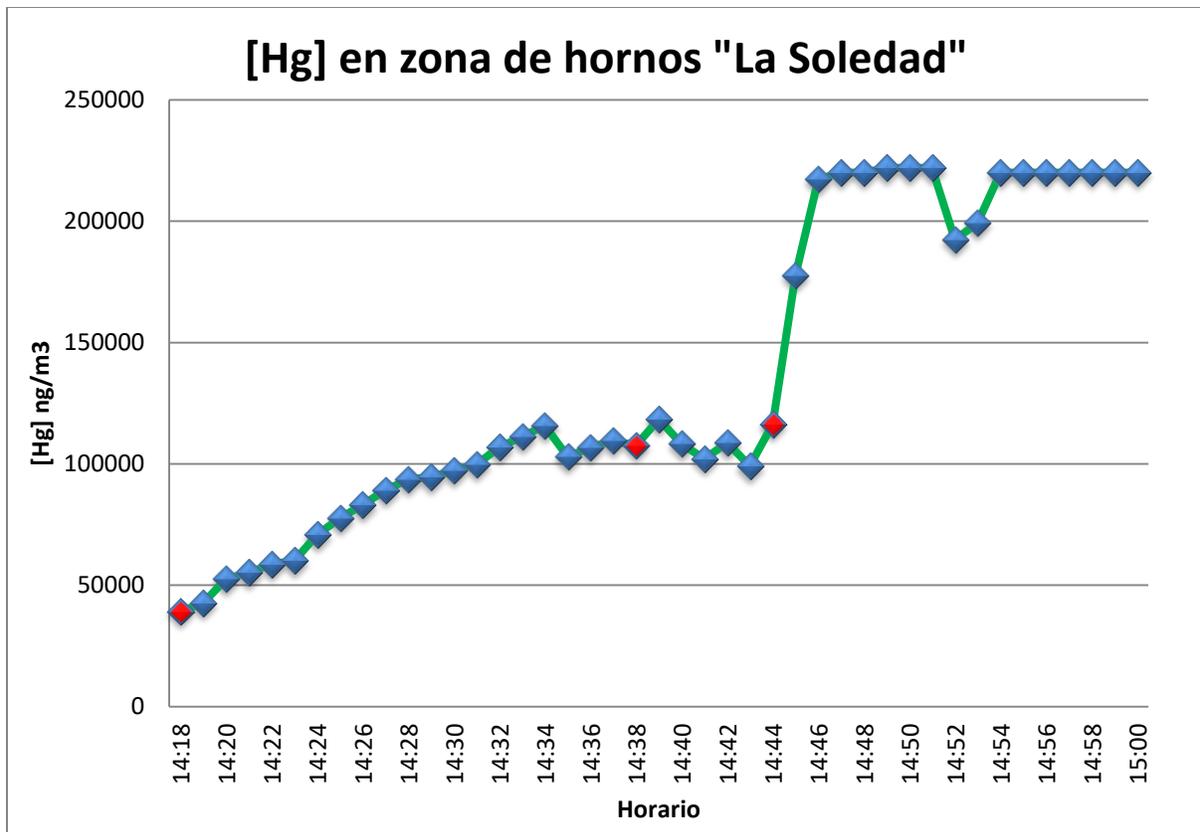


Figura 4.22 Concentración de mercurio en zona de hornos "La Soledad" agosto 2019

Para el caso de la mina de “Camargo”, 6 de las 10 muestras de suelo rebasan el LMP de la normatividad mexicana. El valor mínimo es de 136 mg/kg y el valor máximo es de 2,033 mg/kg, con un promedio de 635.50 mg/kg.

La contaminación es elevada, aunque, comparando con la mina “La Soledad”, los valores son menores.

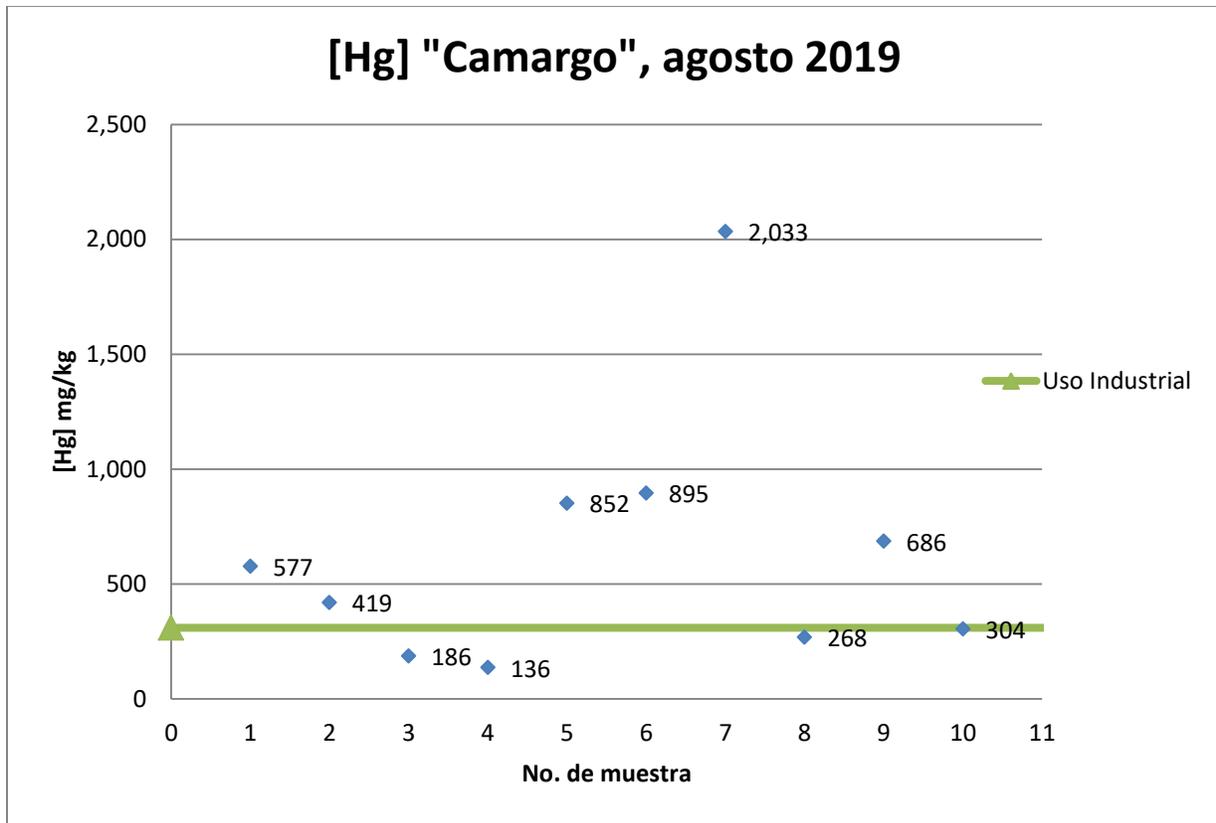


Figura 4.23 Concentración de mercurio en suelo, mina “Camargo” agosto, 2019

Para el monitoreo de aire, recordando que se establecieron 2 rutas. En esta mina no se obtuvo información sobre la duración de la jornada laboral de los mineros, pero, a diferencia de la mina de "La Soledad" en donde sus instalaciones son semicerradas, Camargo es un sitio abierto, por lo que la dispersión de los vapores puede ser mayor.

En la ruta de la zona de hornos, 17 de 22 puntos superaban los 1000 ng/m³ (límite recomendado por la OMS), teniendo el valor mínimo de 301 ng/m³ y un máximo de 142,800 ng/m³. Esto es hasta 1400 veces la concentración recomendada como máxima.

No hay una tendencia clara sobre la concentración de mercurio respecto a la distancia de los puntos de emisión, aunque los valores más grandes se registran en distancias menores a los hornos encendidos.

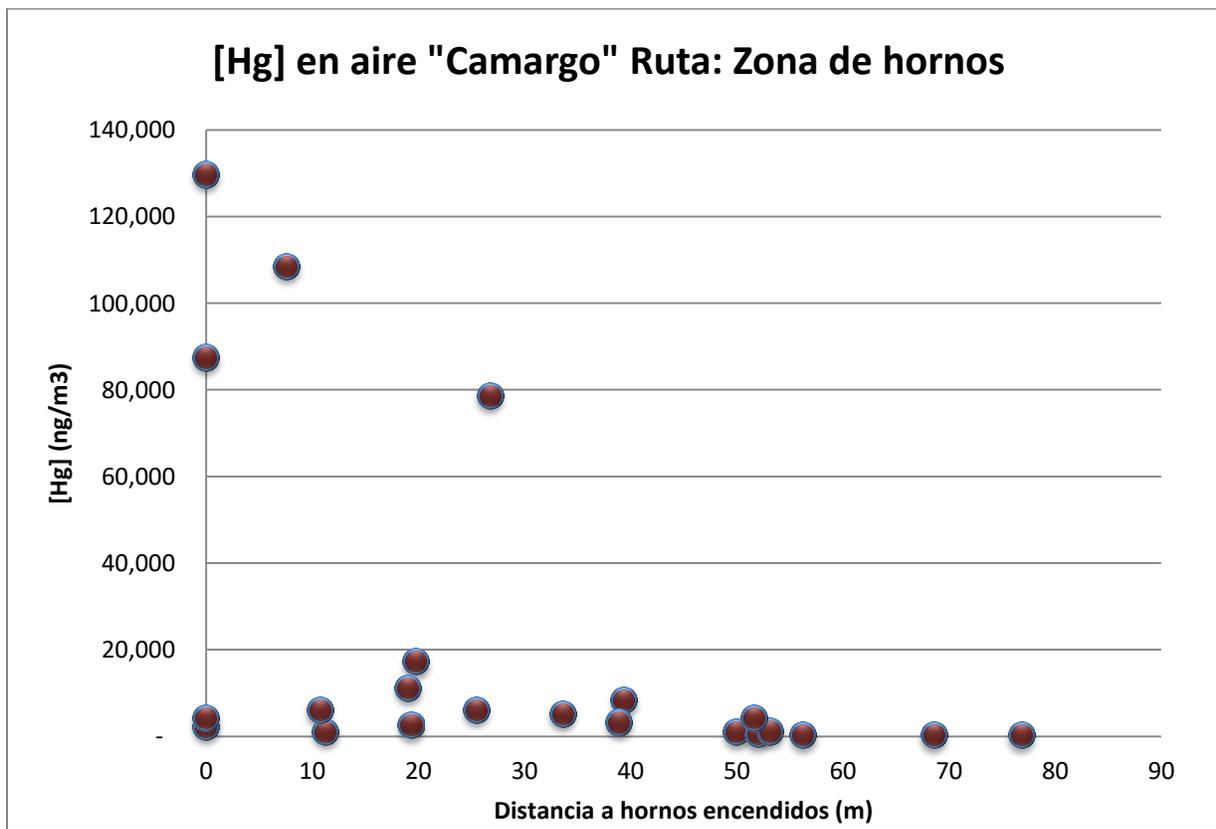


Figura 4.24 Monitoreo de mercurio en aire, mina "Camargo" zona de hornos agosto 2019

Ya en la ruta del camino de la zona de hornos hasta la bocamina, la concentración mínima es de 14,000 ng/m³ en las montañas de jales y la concentración máxima de 66,900 ng/m³ en la bocamina.

En la figura 4.25, la distancia “cero” se refiere a la zona de hornos, donde se llevó a cabo la explotación del mercurio. En los cuadros morados que representan la ruta monitoreada, la concentración de mercurio disminuye conforme se aleja de la zona de hornos. Sin embargo, el cuadro rojo representa la concentración en la bocamina.

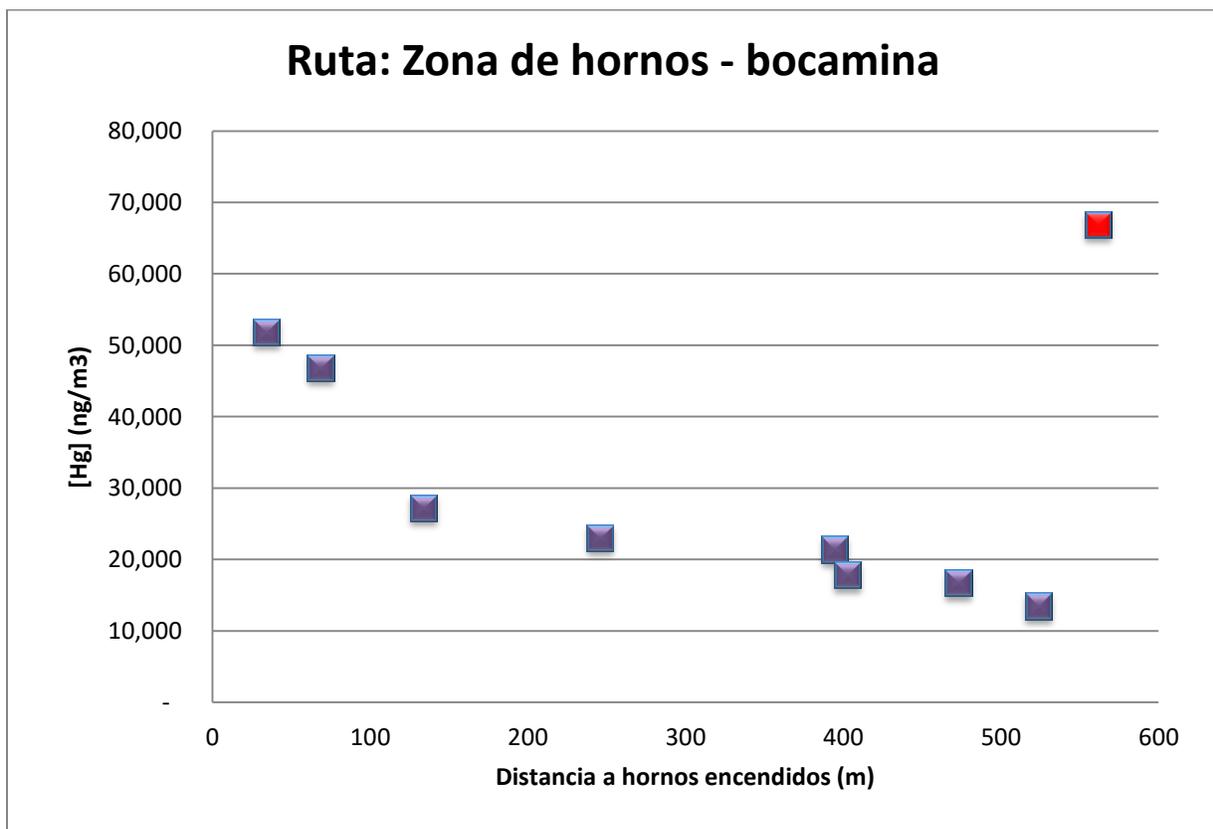


Figura 4.25 Monitoreo de mercurio en aire, mina “Camargo” camino Zona de hornos-bocamina agosto 2019

La meteorología en Camargo registró temperaturas de entre los 18°C y los 27°C, con un promedio de 23.2°C, humedad promedio de 48% y con una velocidad de viento promedio de 1.7 m/s y velocidad máxima en 8.5 m/s.

El siguiente mapa muestra la rosa de los vientos propia del muestreo. Hay muchas poblaciones cercanas en dirección a favor del viento. Las poblaciones cercanas que pueden recibir emisiones de esta mina son Maguey Verde (2.9 km de la mina), Madroño de Amoles (3.6 km de la mina), Tejamanil (7.9 km de la mina), Pinal de Amoles (10.5 km de la mina) e incluso en San Gaspar (8.3 km de la mina) podrían recibir emisiones que, sumadas a las propias de la mina "La Soledad", causarían daños aún más graves en la salud de la población y en el ambiente.

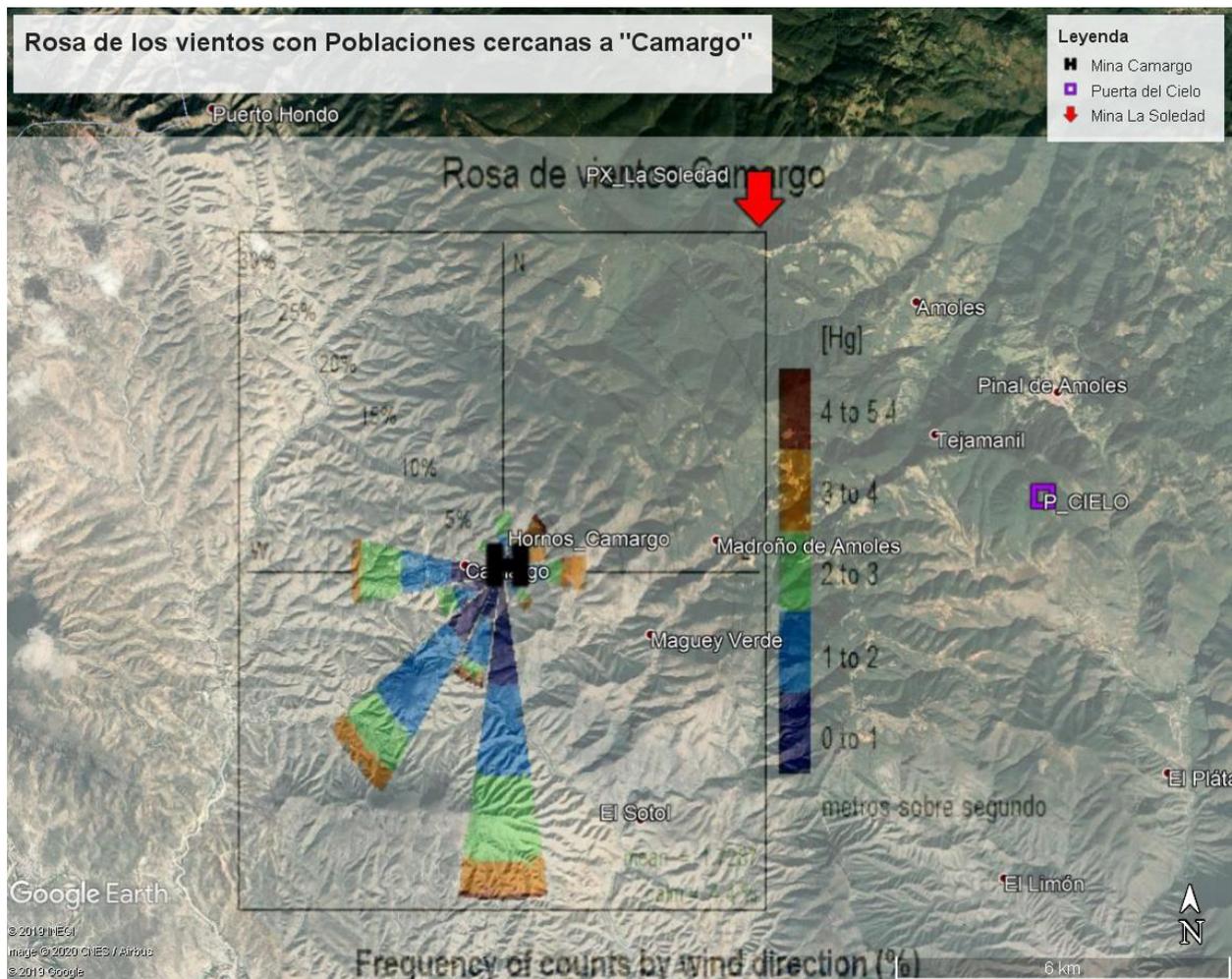


Figura 4.26 Mapa de poblaciones cercanas a "Camargo"

FACTORES DE DISTRIBUCIÓN

Recordando la ecuación para el cálculo del factor de distribución:

$$\sum Y_i = Y_{aire} + Y_{agua} + Y_{suelo} + Y_{producto} + Y_{residuo} + Y_{trat.esp.} = 1$$

En el caso de la minería de mercurio, los valores para Y producto, Y residuo y Y trat.esp. tienen un valor de cero establecido por la metodología del PNUMA. Sin embargo, en este muestreo se anexaron 2 muestras de las cenizas que se generan en la calcinación del cinabrio con el fin de determinar si se pierde mercurio por ser un proceso artesanal de eficiencia menor al 100%.

Las muestras HORNOS_EXPSOL1 y HORNOS_EXPSOL2, han demostrado que las cenizas también cuentan con mercurio. En la muestra de la primera campaña, la concentración es de 9 mg/kg que equivale a pérdidas del 0.009% del mineral, mientras que para la temporada de lluvias la concentración fue de 225 mg/kg equivalente al 0.225% del mineral.

El incremento entre temporadas es de 2500% de agosto respecto a la muestra de abril y, más allá de reportar una mayor pérdida de mercurio, se propone incluir en los valores de los factores de distribución ya que se deben hacer pruebas PECT para comparar con el valor establecido en la NOM 052 SEMARNAT 2005 (0.2 mg/L), si es un residuo peligroso, adjuntarlo como a “ Y trat.esp” o en caso de ser un residuo no peligroso agregar el valor a “ Y residuo”.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

Cumpliendo satisfactoriamente con los objetivos planteados para este estudio, se pueden detallar las siguientes conclusiones.

Inicialmente se analizaron los resultados del Inventario Nacional de Emisiones y Liberaciones de Mercurio (INELM) realizado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) considerando la actividad minera en México, los cuales muestran que la categoría que aporta más emisiones y liberaciones de mercurio es “Producción primaria de metales” con un 74.2% del cual, pertenece a la minería primaria de mercurio el 94.7% equivalente a aproximadamente 804.6 Mg Hg/año. Es por esto por lo que se presta mayor atención en esta actividad.

Los estudios de contaminación ambiental de minas de mercurio activas con una producción anual de al menos 10 Mg se realizaron mediante la toma y análisis de muestras de diversas matrices ambientales. Por lo cual se seleccionaron dos minas en el estado de Querétaro en la zona de la Sierra Gorda. “La Soledad” con una producción estimada de 16.25 Mg/año y “Camargo” con una producción de 20.90 Mg/año, por lo que se cumple con el artículo 3º del Convenio de Minamata donde pide identificar fuentes de suministro de mercurio que generen existencias superiores a lo estipulado. Posteriormente, se determinaron las concentraciones de mercurio en las zonas cercanas a las minas seleccionadas:

- En el caso de “La Soledad” la concentración en aire en las zonas aledañas a la bocamina varía entre los 66 ng/m³ hasta 7925 ng/m³, mientras que la concentración en la zona de hornos alcanza al menos 220,000 ng/m³; para el suelo las concentraciones varían entre los 47 mg/kg a 857 mg/kg. La concentración de mercurio en agua está por debajo de los límites de detección.
- Para “Camargo” la concentración de mercurio en aire varía entre 14,000 ng/m³ y 51,300 ng/m³ en zonas aledañas; en zona de hornos alcanzó los 142,800 ng/m³. En suelo las concentraciones varían con un mínimo en 135 mg/kg y un máximo de 2,033 mg/kg. No se obtuvieron muestras de cuerpos de agua.

El grado de contaminación ambiental de los sitios debido a la presencia de mercurio, se evaluó comparando los resultados obtenidos con los límites máximos permisibles establecidos por organismos internacionales y regulación nacional, determinándose que las muestras de las zonas seleccionadas rebasan los valores recomendados. Con base en lo anterior se considera un sitio contaminado y probablemente la salud de la población y de los trabajadores se vea afectada.

ANEXO I. PLANES DE MUESTREO

Plan de muestreo campaña abril 2019.

<p>Plan de muestreo de acuerdo a la norma mexicana NMX-AA-132-SCFI-2016 "Muestreo de suelos para la identificación y cuantificación de metales y metales pesados, y manejo de la muestra"</p> <p>1. OBJETIVO</p> <p>Realizar un muestreo en suelo, aire y agua en una zona alejada a la mina de "La Soledad" en el estado de Querétaro, México, para la identificación de contaminación con mercurio.</p> <p>2. LUGAR Y FECHA DE ELABORACIÓN</p> <p>Ciudad Universitaria, Ciudad de México a 10 de marzo de 2019</p> <p>3. NOMBRE Y FIRMA DE RESPONSABLES DE LA ELABORACIÓN</p> <p>David Fernando Huerta Coloxia Georgina Fernández Villagómez Arturo Gavilán García</p> <p>4. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES Y TIEMPOS ESTIMADOS DE EJECUCIÓN</p> <ul style="list-style-type: none"> > Transporte CDMX – Querétaro (3 h). > Transporte Querétaro – Dinal de Amoles (2h 30 min) > Transporte Dinal de Amoles – Mina "La Soledad" (1h) > Muestreo de aire (4-2h): <ul style="list-style-type: none"> • Montaje equipo Lumex (20 min) • 14 puntos (15 min/punto) • Desmonte de equipo Lumex (20 min) • Muestreo de suelo (4h): <ul style="list-style-type: none"> • Identificación del sitio (20 min) • Muestreo exploratorio 14 puntos (15 min/punto) • Montaje de muestras a camioneta (10 min) > Transporte Mina "La Soledad" – Dinal de Amoles (1h) > Transporte Dinal de Amoles – Sitio de muestreo de fondo (30 min) > Muestreo de fondo (4h): <ul style="list-style-type: none"> • Muestreo de fondo, aire*, 12 puntos: (15 min/punto: 3h) • Montaje y desmonte de equipo Lumex (40 min) • Muestreo de fondo, suelo, 12 puntos (15 min/punto: 3h) • Montaje de muestras a camioneta (10 min) > Transporte Dinal de Amoles – Querétaro (2h 30 min) > Transporte Querétaro - CDMX (3 h). > Entrega de muestras – Facultad de Ingeniería (2h): 	<ul style="list-style-type: none"> • Recepción de muestras (1h) • Almacenamiento (1h) <p>Desglose de actividades durante el muestreo:</p> <p>Muestreo de aire:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Calibración de equipo Lumex • Medición de condiciones meteorológicas • Monitoreo de la zona • Desmonte de equipo <p>Muestreo exploratorio de suelo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Medición de parámetros ambientales por punto • Excavación y toma de muestras • Etiquetado y almacenamiento de muestras • Recolección de muestras y equipo utilizado <p>Muestreo de fondo de aire:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Calibración de equipo Lumex • Medición de condiciones meteorológicas • Monitoreo de la zona • Desmonte de equipo <p>Muestreo de fondo de suelo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Medición de parámetros ambientales • Excavación y toma de muestras • Etiquetado y almacenamiento de muestras • Recolección de muestras y equipo utilizado <p>5. DEFINICIÓN DE RESPONSABILIDADES POR ACTIVIDAD</p> <p>Transporte de equipo, material y personal – (INECC)</p> <p>Encargado de cadena custodia –</p> <p>Encargado de monitoreo de aire (sitio) –</p> <p>Encargado de monitoreo de aire (fondo) –</p> <p>Encargado de toma de muestras de suelo (sitio) –</p> <p>Encargado de toma de muestras de suelo (fondo) –</p> <p>Encargado de libreta de campo -</p> <p>Recepción de muestras – (FI UNAM)</p> <p>Almacenamiento de muestras - (FI UNAM)</p> <p>6. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Clima</td> <td>Semiárido-templado</td> </tr> <tr> <td>Temperatura media anual</td> <td>> 18°C</td> </tr> <tr> <td>Temperatura máxima</td> <td>28°C</td> </tr> <tr> <td>Precipitación pluvial media anual</td> <td>500-600 mm</td> </tr> </table>	Clima	Semiárido-templado	Temperatura media anual	> 18°C	Temperatura máxima	28°C	Precipitación pluvial media anual	500-600 mm
Clima	Semiárido-templado								
Temperatura media anual	> 18°C								
Temperatura máxima	28°C								
Precipitación pluvial media anual	500-600 mm								

Velocidad del viento (ene-sep)	1.2 - 2 m/s
Dirección del viento (ene-may)	W
Dirección del viento (jun-sep)	ENE
Velocidad del viento (oct-dic)	1.6-2.1 m/s
Dirección del viento (oct-dic)	E
Humedad relativa	60% promedio anual
Días nublados (promedio anual)	116
Involación anual (promedio anual)	< 2815 h
Días de tormenta (promedio anual)	6
Días de helada (promedio anual)	13

Mina "La Soledad" ubicada a 6 km al N63° W de la cabecera municipal de Pinal de Amoles, Qro; ubicada en las coordenadas UTM X: 429 550, Y:2 340 120. Con elevación de 2 900 msnm.

El acceso se da por la cabecera municipal de Pinal de Amoles, recorriendo 9.3 km por la carretera No. 120 con dirección a San Juan del Río, hasta el Puerto Los Velázquez. Se continúa al norte 8 km por la brecha al poblado de San Gaspar, la mina se encuentra en las inmediaciones de esta población.

Depósito mineral metálico con roca encajonante caliza. La veta de dimensiones 70m de longitud por 50m de profundidad y potencia 1m; la mineralogía registra chabirio y calcita de origen epitermal.

El potencial de la mina es de 9 500 toneladas. Actualmente se encuentra abandonada.

7. SUPERFICIE DEL ÁREA DE ESTUDIO

0.72 Km2 o 23,062.52 m2

8. METALES Y METALOIDES A CUANTIFICAR / METODOS DE MEDICION.

Mercurio Total (Elemental, oxidado, metilado en caso de haber cuerpos de agua cercanos).

Medición de mercurio en suelo por pirólisis sin pretratamiento químico
Medición de mercurio en agua por técnica de vapor frío.

9. TIPO DE MUESTREO

Los muestreos que se llevarán a cabo serán:

Muestreo exploratorio superficial: con el objetivo de obtener las muestras de suelo representativas para establecer la presencia de contaminación y, en su caso, la distribución horizontal de la misma, y valorar su posible migración vertical. y:

Muestreo de fondo: para obtener muestras representativas de suelos contiguos al área de estudio que permitan medir las concentraciones de metales y metaloides en suelos no modificados por el ser humano. Con ello se definirán los niveles de fondo locales que sirven de referencia y representación del suelo natural no afectado.

No se utilizará el muestreo de detalle debido a que se requiere conocer el área que presenta concentraciones superiores a las de referencia establecidas por la normatividad.

De igual forma no se utilizará el muestreo final comprobatorio, ya que solo aplica para sitios remediados una vez localizada su contaminación.

Para el caso de aire se realizará un muestreo de fondo entre la población de Pinal de Amoles y la mina "La Soledad".

A su vez, se realizará el monitoreo del aire en la mina, tomando los puntos del muestreo de suelo para medir al mismo tiempo la concentración de mercurio en aire.

10. METODO PARA LA DISTRIBUCION DE PUNTOS DE MUESTREO

Se utilizará una distribución de puntos de muestreo sistemático para estimar con precisión las zonas críticas, caracterizar el sitio y adaptación fácil a estudios estadísticos.

El muestreo se realizará por medio de una cuadrícula sobrepuesta a toda la superficie de estudio, el tamaño de los cuadros es en función del número de puntos de muestreo y de la superficie de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$l = \left(\frac{A}{n_{\min}} \right)^{1/2}$$

Donde:

l – es la longitud de los lados de cada uno de los figuras geométricas utilizadas de igual tamaño.

A – es la superficie en m2

n min – es el número de puntos de muestreo de acuerdo con la NMX.

La longitud de los cuadros se debe redondear hacia abajo, aun cuando el número de puntos de muestreo aumente el número de puntos de muestreo indicado en los tablas es mínimo y de acuerdo a las circunstancias locales se deben tomar muestras adicionales. Los muestreos son tomados en las intersecciones de la red de la cuadrícula.

En el caso del muestreo de fondo se usará una distribución de muestreo aleatorio simple debido a que es recomendable para este tipo de muestreos, es fácil de

implementar y proteger contra la selección sesgada de la localización de las muestras garantizando la representatividad de estas.

No se usará muestreo dirigido debido a que no se cuenta con un experto el cual pueda guiar la toma de muestras e interpretar los datos.

No se usará muestreo estratificado ya que no se cuenta con información previa de la población de muestras por lo cual no se pueden definir los estratos.

11. NÚMERO Y DISTRIBUCIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO, NÚMERO Y CANTIDAD DE MUESTRAS (incluye para aseguramiento de calidad)

Según la tabla de muestreo exploratorio:

Superficie del área de estudio: 23.062.52 m² equivalente a 2.306 ha

Muestreo horizontal:

De 2 hasta superficies menores a 3 hectáreas:

Número mínimo de puntos de muestreo superficial: 14

Número de pozos verticales: 3.

Profundidad de muestreo superficial : 30 cm

Profundidad de muestreo de pozos 1 m

Distribución de los puntos: sistemática, siguiendo la ecuación:

$$l = \left(\frac{A}{V_{\text{muestra}}} \right)^{1/2}$$

Donde:

l – es la longitud de los lados de cada una de las figuras geométricas utilizadas de igual tamaño.

A – es la superficie en m²

n min – es el número de puntos de muestreo de acuerdo con la NMX.

$$l = \left(\frac{23062.52}{14} \right)^{1/2} = 40.59 \text{ m}$$

Muestreo vertical:

3 pozos verticales correspondientes en los puntos 3, 8 y 12 del plano del sitio de estudio.

Para el muestreo de fondo se establece que:

Se diseña una malla cuadrada sobre el terreno de 160 x 160 metros con 25 vértices.

Se recolectarán 12 puntos mínimo

Profundidad de 30 cm

El muestreo debe ser aleatorio por lo que se programó en R la función de números complements al azar, del cual se obtuvo que los puntos a recolectar son:

n <- 12

x <- runif(n,1,25)

x

[1] 7.483296 10.766738 1.321968 10.17731 21.872580 9.168376 12.469923 15.389580
[9] 12.844991 5.469222 20.856960 17.043202

Redondeando los números a enteros, los muestras a recolectar son:

7,11,10,22,9,12,15,15,21,17

Ordenados son:

1 – 5 – 7 – 9 – 10 – 11 – 12 – 13 – 15 – 17 – 21 – 22.

12. JUSTIFICACIÓN DE UBICACIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO Y PROFUNDIDAD DE LAS MUESTRAS

Los puntos de muestreo exploratorio – sistemático se ubican superponiendo una malla de 40m X 40m en el plano del área de estudio, seleccionando los 14 puntos que estuvieron dentro del terreno.

La profundidad al ser superficial será de 30 cm.

Para el muestreo de fondo – aleatorio, se toman 12 puntos al azar como lo establece la misma norma, para la selección de los puntos dentro de una cuadrícula de 25 nodos, debido a la división del terreno de 160m x 160m en fracciones de 40m X 40m.

Para que sean aleatorios como menciona la norma, se obtuvieron números al azar en el programa RStudio.

Todos los tomas de muestras serán de forma manual debido a las limitaciones de equipo disponible.

13. PLANOS GEOREFERENCIADOS EN COORDENADAS UTM (plano de 60 x 90 cm indicando la superficie del área de estudio, ubicación de puntos de muestreo, vías de acceso, edificaciones y estructuras en el área)

Véase Anexo I Mapa con ubicación de puntos de muestreo exploratorio.

14. PROCEDIMIENTO DE LAVADO DE EQUIPO

Se debe limpiar la pala de muestreo una vez terminada la recolección de muestra en cada punto con agua destilada y detergente libre de fosforo.

15. TIPOS DE ENVASES, IDENTIFICACIÓN, PRESERVACIÓN Y TRANSPORTE DE MUESTRAS, TIEMPO MÁXIMO PREVIO AL ANÁLISIS

Para el registro, envasado, etiquetado y sellado de las muestras

Al obtener las muestras de suelo, se debe registrar toda la información de muestreo en la libreta de campo.

Las muestras deben ser envasadas, etiquetadas y selladas conforme a las siguientes especificaciones:

- Envase cerrado de manera hermética.
- Etiquetado y sellado de recipientes posterior a la recolección de cada una de las muestras.
- La etiqueta debe colocarse en un lugar visible, sin sobrepasar las dimensiones del envase.
- La etiqueta debe contener: fecha y hora en que se tomó la muestra, lugar del muestreo o proyecto, número o clave de identificación, iniciales de la persona que tomó la muestra.
- El sello debe colocarse sobre el cuerpo del envase y en la tapa o tapas.
- Para bolsas de polietileno deben tener sello para garantizar su inviolabilidad.
- En el sello de la muestra se debe escribir la clave que deberá ser igual a la de la etiqueta.

Véase Anexo II Ejemplo de etiqueta

Para el muestreo el tiempo máximo entre la toma de muestra y la medición de este, es de 28 días.

16. MEDIDAS Y EQUIPO DE SEGURIDAD

Evitar contacto prolongado con la piel mediante uso de EPP como bata, lentes de seguridad, guantes y respiradores adecuados.

De preferencia se debe usar uniformes desechables y mascaros desechables. Los materiales más resistentes al mercurio son sintéticos como PVC, poliestireno, hule de nitrilo, Viton, hule butílico y neopreno.

17. MEDIDAS DE ASEGURAMIENTO DE CALIDAD DE MUESTREO

Durante el traslado, es necesario evitar el efecto de factores externos que pueden cambiar la naturaleza de las muestras. Se debe mantener la temperatura de las muestras a 4°C.

La cadena custodia original debe acompañar a las muestras desde su toma, durante su traslado y hasta el ingreso al laboratorio.

Cadena custodia:

Véase Anexo III Formato de Cadena Custodia.

Libreta de campo:

Véase Anexo IV Formato de Libreta de campo.

MATERIAL Y EQUIPO DE MUESTREO Y CONSIDERACIONES PARA LA TOMA DE MUESTRAS

- Machete y tijeras para corte de vegetación.
- 100 bolsas tipo Ziploc.
- Cáter
- Cinta camela.
- Aparatos para medición de condiciones climatológicas:
- Potenciómetro
- Termómetro para suelo
- Humidímetro
- Conductímetro
- Anemómetro
- Tamizador
- Bolígrafos, marcadores y etiquetas.
- Flexómetro
- Cámara fotográfica
- Libreta de campo
- Mapas de la zona de estudio.
- Localizador GPS.
- Hielera para el almacenamiento de muestras
- Bolsas frías para mantener a 4°C las muestras
- Equipo Lumex 95-RA*

EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

- ✓ Mascarilla con cartuchos
- ✓ Cefos de seguridad
- ✓ Bata
- ✓ Overol
- ✓ Gorra o sombrero
- ✓ Guantes de nitrilo

CONSIDERACIONES PARA LA TOMA DE MUESTRAS

- El muestreo se debe realizar con equipo o herramienta de acero inoxidable o plástico para que no altere las características de la muestra.
- Se debe evitar que el equipo y materiales usados en el muestreo provoquen contaminación entre las diferentes muestras, se deben lavar con agua y detergente libre de fosfatos.
- Previo a la toma de una muestra se deben retirar los materiales mayores a 2 cm, así como los restos de plantas, salvo los que se consideren importantes para el caso de estudio.
- Se debe garantizar al menos 500 g de suelo para que sea suficiente para la preparación y aplicación de los métodos de medición necesarios.
- Se deben tomar fotografías del área de estudio y de los puntos de muestreo, claramente referenciados.
- La toma de muestra se debe apegar al plan de muestreo. Las incidencias y desviaciones al mismo se deben justificar y documentar en la libreta de campo.



- El muestreo se debe realizar con equipo o herramienta de acero inoxidable o plástico para que no altere las características de la muestra.
- Se debe evitar que el equipo y materiales usados en el muestreo provoquen contaminación entre las diferentes muestras, se deben lavar con agua y detergente libre de fosfatos.
- Previo a la toma de una muestra se deben retirar las materias mayores a 2 cm, así como los restos de plantas, salvo los que se consideren importantes para el caso de estudio.
- Se debe garantizar al menos 500 g de suelo para que sea suficiente para la preparación y aplicación de los métodos de medición necesarios.
- Se deben tomar fotografías del área de estudio y de los puntos de muestreo, claramente referenciados.
- La toma de muestra se debe anotar al plan de muestreo. Las incidencias y desviaciones al mismo se deben justificar y documentar en la libreta de campo.

ANEXO I MAPA CON UBICACIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO EXPLORATORIO



ANEXO II. EJEMPLO DE ETIQUETA

CLAVE: LSO_EXP01

UBICACIÓN: _____ UTM X _____ UTM Y

FECHA DE TOMA DE MUESTRA: _____

HORA DE TOMA DE MUESTRA: _____

NOMBRE DEL RESPONSABLE: _____

LSO = Mina "La Soledad"

EXP = Muestreo exploratorio

FON = Muestreo de fondo

01 = Punto de muestreo

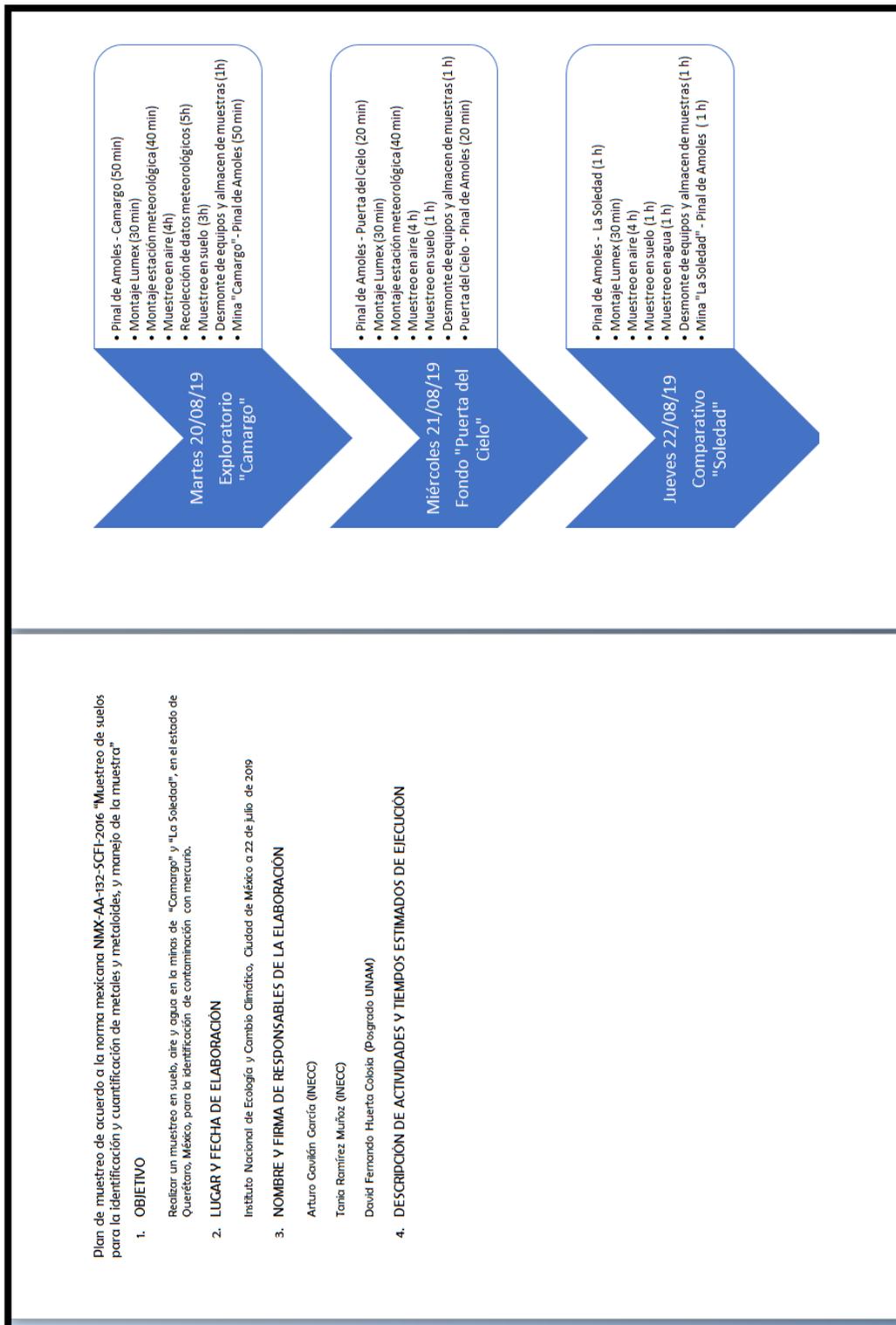
ANEXO III FORMATO DE CADENA CUSTODIA

CADENA CUSTODIA DEL PLAN DE MUESTREO MINA "LA SOLEDAD"		 INECC <small>INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO</small>		 UNAM POSGRADO Ingeniería								
Nombre de la empresa	Facultad de Ingeniería, UNAM - Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático INECC.											
Responsables del muestreo	Lic. David Fernando Huerta Córdova											
Laboratorio de recepción de muestras												
Clave de muestra	Fecha	Nombre	Muestreador	Iniciales	Laboratorio receptor	Análisis requerido	No. de envases	Tipo de muestra	Etiquetas	Firma	Fecha	Nota
ISO_DP001												
ISO_DP002												
ISO_DP003												
ISO_DP004												
ISO_DP005												
ISO_DP006												
ISO_DP007												
ISO_DP008												
ISO_DP009												
ISO_DP010												

ANEXO IV FORMATO DE LIBRETA DE CAMPO

 <p>INECC INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO</p>		<p>MUESTRO MINA "LA SOLEDAD"</p> <p>LIBRETA DE CAMPO</p> <p>ELABORADO POR: I.Q. DAVID F HUERTA COLOSIA</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA - UNAM</p> <p>POSGRADO DE INGENIERÍA AMBIENTAL</p> <p>INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO INECC</p>										 <p>UNAM POSGRADO Ingeniería</p>			
		CLAVE MUESTRA		FECHA		HORA									
		RESPONSABLE DE TOMA DE MUESTRA													
		LUBIGACIÓN													
		<p style="text-align: center;">CARACTERÍSTICAS DEL SITIO</p>													
pH		Temp. Ambiente		Humedad relativa		Vel. Del viento		Temp. Suelo		Conductividad					
PRESENCIA DE VEGETACIÓN															
USO DEL SUELO															
INFRAESTRUCTURA															
ACTIVIDADES AJENAS AL PROCESO DE CONTAMINACIÓN															
PRESENCIA DE RESIDUOS O MATERIAL DE RELLENO															
CARACTERÍSTICAS DEL SUELO															
Textura		Color		Presencia de humedad		Presencia de hojarasca		Otros materiales eliminados							

Plan de muestreo agosto 2019.



Desglose de actividades durante el muestreo:

Muestreo exploratorio de aire:

- Montaje de equipo Lumex
- Montaje de estación meteorológica
- Medición de condiciones meteorológicas
- Monitoreo de mercurio en la zona
- Desmonte de equipo

Muestreo exploratorio de suelo:

- Medición de parámetros ambientales por punto
- Excavación y toma de muestras
- Etiquetado y almacenamiento de muestras
- Recolección de muestras y equipo utilizado

Muestreo de fondo de aire:

- Montaje de equipo Lumex
- Montaje de estación meteorológica
- Medición de condiciones meteorológicas
- Monitoreo de mercurio en la zona
- Demonte de equipo

Muestreo de fondo de suelo:

- Medición de parámetros ambientales
- Excavación y toma de muestras
- Etiquetado y almacenamiento de muestras
- Recolección de muestras y equipo utilizado

5. DEFINICIÓN DE RESPONSABILIDADES POR ACTIVIDAD

Transporte de equipo, material y personal – INECC-CGCSA

Encargado de cadena custodia – Tania Ramírez – INECC

Encargado de monitoreo de aire (sitio y fondo) – David Huerta – FI LUNAM

Encargado de toma de muestras de suelo (sitio y fondo) David Huerta – FI LUNAM

Encargado de libreta de campo – Bechi Gatica – INECC

Recepción de muestras – Georgina Fernández – FI LUNAM

Almacenamiento de muestras – Arturo Cavilán – INECC

6. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

	Mina "Camargo"	Mina "La Soledad"
Elevación (msnm)	1935	2792
Clima	Sub húmedo	Semi-seco
Temperatura máx.	28°C	28°C
Temperatura mín.	-3°C	ND
Temperatura prom.	18°C	18°C
Precipitación media anual	500-800 mm	500-800 mm
Humedad relativa anual	60%	60%
Insolación anual	<2815 h	<2815 h
Días nublados	116	116
Días de tormentas eléctricas	6	6
Días de heladas	13	13

Mina "Camargo". Localizada en el municipio de Deíramiller, Querétaro, con acceso por la carretera federal No.120 a la altura de la comunidad de Camargo; ubicada en las coordenadas UTM X: 425 383, Y: 2 334 143. Con elevación de 1935 msnm.

Mina "La Soledad" ubicada a 6 km al Mes^o W de la cabecera municipal de Pinal de Anoles, Oro; ubicada en las coordenadas UTM X: 429 550, Y:2 340 120. Con elevación de 2 900 msnm.

SUPERFICIE DEL ÁREA DE ESTUDIO

Mina	Superficie (ha)
Camargo	0.5
La Soledad	0.1

7. METALES Y METALOIDES A CUANTIFICAR / MÉTODOS DE MEDICIÓN.

Mercurio metálico

8. TIPO DE MUESTREO

Los muestreos que se llevarán a cabo serán:

Muestreo exploratorio superficial: con el objetivo de obtener las muestras de suelo representativas para establecer la presencia de contaminación y, en su caso, la distribución horizontal de la misma, y valorar su posible migración vertical, y;

Muestreo comparativo: una vez obtenidos los resultados del muestreo anterior, se tomarán muestras en los sitios identificados como de mayor concentración de mercurio.

A su vez, se realizará el monitoreo del aire en la mina, en el sitio donde se lleve a cabo el procesamiento del metal y en dado caso que la comunidad lo permita, un muestreo de agua superficial en el cuerpo de agua identificado.

9. MÉTODO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO

Se utilizará una distribución de puntos de muestreo sistemático para estimar con precisión las zonas críticas, caracterizar el sitio y adaptación fácil a estudios estadísticos.

El número de puntos a muestrear de acuerdo a la Tabla 1 de la **NMX** está en función de la superficie del sitio, a partir de los 30 ha se utiliza la ecuación:

$$Y = X^{0.3} * 11.71$$

Dónde:

Y – número mínimo de puntos de muestreo
 X – superficie del suelo de la zona de estudio (ha)

El muestreo se realizará por medio de una cuadrícula sobrepuesta a toda la superficie de estudio, el tamaño de los cuadros es en función del número de puntos de muestreo y de la superficie de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$l = \left(\frac{A}{n_{\text{min}}} \right)^{1/2}$$

Dónde:

l – es la longitud de los lados de cada una de las figuras geométricas utilizados de igual tamaño.

A – es la superficie en m2

n min – es el número de puntos de muestreo de acuerdo con la **NMX**.

La longitud de los cuadros se debe redondear hacia abajo, aún cuando el número de puntos de muestreo aumente, el número de puntos de muestreo indicado en los tablos es mínimo y de acuerdo a las circunstancias locales se deben tomar muestras adicionales. Las muestras son tomadas en los intersecciones de la retícula de la cuadrícula.

En el caso del muestreo de fondo se usará una distribución de muestreo aleatorio simple debido a que es recomendable para este tipo de muestreos, es fácil de implementar y protege contra la selección sesgada de la localización de las muestras garantizando la representatividad de estas.

10. NÚMERO Y DISTRIBUCIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO, NÚMERO Y CANTIDAD DE MUESTRAS (incluye para aseguramiento de calidad)

Mina	No. De Puntos	Longitud de lados (m)
Camargo	10	22

La Soledad	3	N/A
Puerta del Cielo	1	N/A

11. JUSTIFICACIÓN DE UBICACIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO Y PROFUNDIDAD DE LAS MUESTRAS

Los puntos de muestreo exploratorio-sistemático se ubicaron sobreponiendo una malla de en el plano del área de estudio, seleccionando los puntos que estuvieran dentro del terreno.

La profundidad al ser superficial será de 10 a 15 cm.

Para que sean aleatorios como menciona la norma, se obtuvieron números al azar en el programa **RStudio**.

Todas las tomas de muestras serán de forma manual debido a las limitaciones de equipo disponible.

12. PLANOS GEOREFERENCIADOS EN COORDENADAS UTM (plano de 60 x 90 cm, indicando la superficie del área de estudio, ubicación de puntos de muestreo, vías de acceso, edificaciones y estructuras en el área)

Véase Anexo I Mapas de las minas.

13. PROCEDIMIENTO DE LAVADO DE EQUIPO

Se debe limpiar la pala de muestreo una vez terminada la recolección de muestra en cada punto con agua destilada y detergente libre de fosforo.

14. TIPOS DE ENVASES, IDENTIFICACIÓN, PRESERVACIÓN Y TRANSPORTE DE MUESTRAS, TIEMPO MÁXIMO PREVIO AL ANÁLISIS

Para el registro, envasado, etiquetado y sellado de las muestras

Al obtener las muestras de suelo, se debe registrar toda la información de muestreo en la libreta de campo.

Las muestras deben ser envasadas, etiquetadas y selladas conforme a las siguientes especificaciones:

- a) Envase cerrado de manera hermética.
- b) Etiquetado y sellado de recipientes posterior a la recolección de cada una de las muestras.
- c) La etiqueta debe colocarse en un lugar visible, sin sobrepasar las dimensiones del envase.
- d) La etiqueta debe contener: fecha y hora en que se tomó la muestra, lugar del muestreo o proyecto, número o clave de identificación, iniciales de la persona que tomó la muestra.
- e) El sello debe colocarse sobre el cuerpo del envase y en la tapa o tapas.
- f) Para bolsas de polietileno deben tener tener sello para garantizar su inviolabilidad.

9) En el sello de la muestra se debe escribir la clave que deberá ser igual a la de la etiqueta.

Véase Anexo II Ejemplo de etiqueta

Para el mercurio el tiempo máximo entre la toma de muestra y la medición de este, es de 28 días.

15. MEDIDAS Y EQUIPO DE SEGURIDAD

Evitar contacto prolongado con la piel mediante uso de EPP como bata, lentes de seguridad, guantes y respiradores adecuados.

De preferencia se debe usar uniformes desechables y mascarar desechables.

Los materiales más resistentes al mercurio son sintéticos como PVC, polietileno, hule de nitrilo, Viton, hule butílico y neopreno.

16. MEDIDAS DE ASEGURAMIENTO DE CALIDAD DE MUESTREO

Durante el traslado, es necesario evitar el efecto de factores externos que pueden cambiar la naturalidad de las muestras. Se debe mantener la temperatura de las muestras a 4°C.

La cadena custodia en original debe acompañar a las muestras desde su toma, durante su traslado y hasta el ingreso al laboratorio.

Cadena custodia:

Véase Anexo III Formato de Cadena Custodia.

Libreta de campo:

Véase Anexo IV Formato de Libreta de campo.

MATERIAL Y EQUIPO DE MUESTREO Y CONSIDERACIONES PARA LA TOMA DE MUESTRAS

- Machete y tijeras para corte de vegetación.
- 100 bolsas tipo Ziploc.
- Cáter
- Cinta canela.
- Aparatos para medición de condiciones climatológicas:
 - Potenciómetro
 - Termómetro para suelo
 - Humidímetro
 - Conductímetro
 - Anemómetro
 - Tamizador

• Bolígrafos, marcadores y etiquetas.

• Flexómetro

• Cámara fotográfica

• Libreta de campo

• Mapas de la zona de estudio.

• Localizador GPS.

• Hielera para el almacenamiento de muestras

• Bolsas frías para mantener a 4°C las muestras

• Equipo Lumex 915-RA*

EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

- ✓ Mascarella con cartuchos
- ✓ Cafes de seguridad
- ✓ Bata
- ✓ Overol
- ✓ Gorra o sombrero
- ✓ Guantes de nitrilo

CONSIDERACIONES PARA LA TOMA DE MUESTRAS

• El muestreo se debe realizar con equipo o herramienta de acero inoxidable o plástico para que no altere los característicos de la muestra.

• Se debe evitar que el equipo y materiales usados en el muestreo provoquen contaminación entre los diferentes muestros, se deben lavar con agua y detergente libre de fosfatos.

• Previo a la toma de una muestra se deben retirar los materiales mayores a 2 cm, así como los restos de plantas, salvo los que se consideren importantes para el caso de estudio.

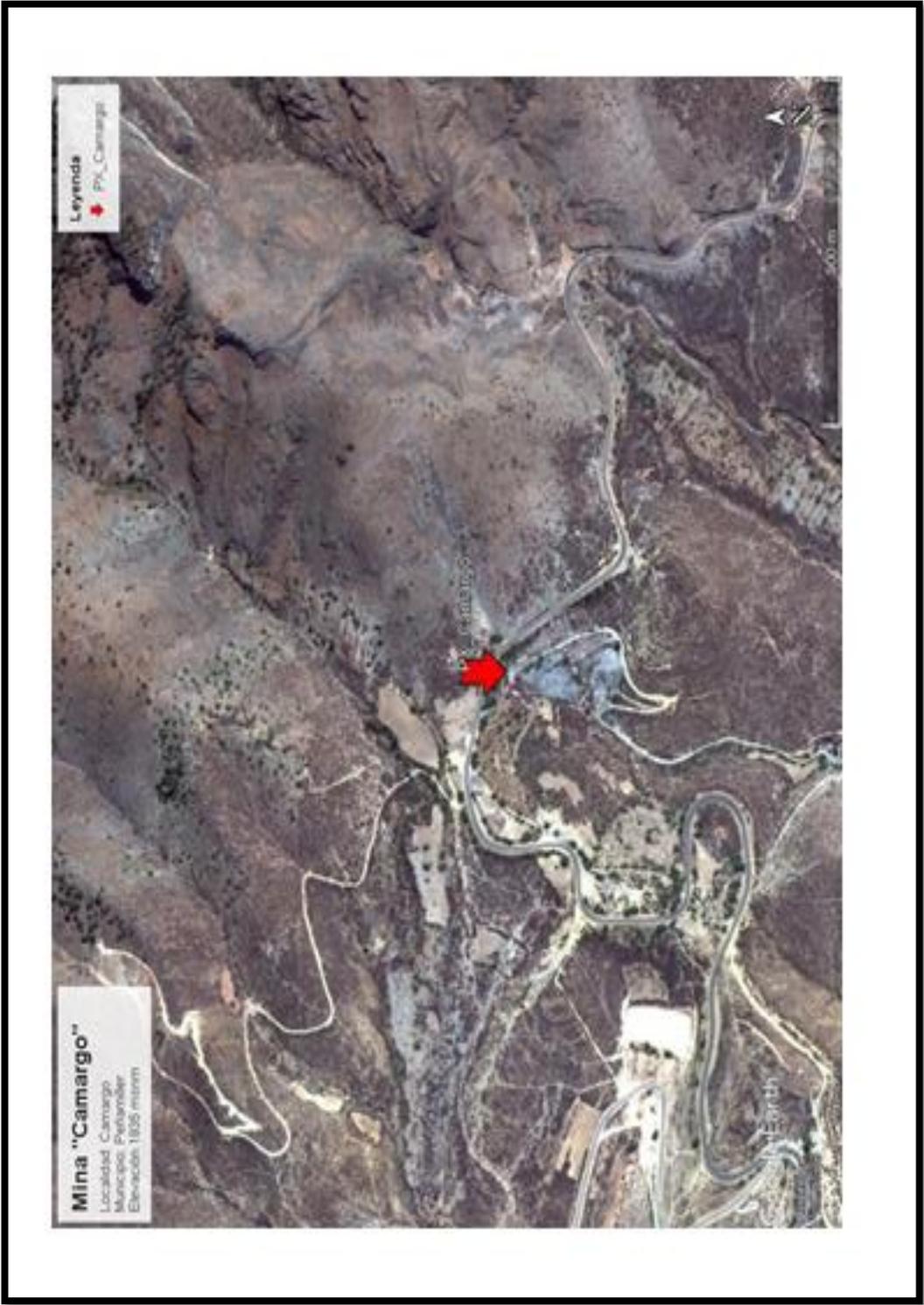
• Se debe garantizar al menos 500 g de suelo para que sea suficiente para la preparación y aplicación de los métodos de medición necesarios.

• Se deben tomar fotografías del área de estudio y de los puntos de muestreo, claramente referenciados.

• La toma de muestra se debe apegar al plan de muestreo. Las incidencias y desviaciones al mismo se deben justificar y documentar en la libreta de campo.

ANEXO I MAPAS DE LAS MINAS







ANEXO III FORMATO DE CADENA CUSTODIA

CADENA CUSTODIA DEL PLAN DE MUESTREO MINA "LA SOLEDAD"														
Nombre de la empresa		Facultad de Ingeniería, UNAM - Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático INECC.												
Responsables del muestreo		I.Q. David Fernando Huerta Colón												
Laboratorio de recepción de muestras														
Clave de muestra	Fecha	Hora	Muestreador	Iniciales	Laboratorio receptor	Análisis requerido	No. De empaques	Tipo de muestra	Entrega	Firma	Recibe	Firma	Fecha	Hora
LSO_EXP01														
LSO_EXP02														
LSO_EXP03														
LSO_EXP04														
LSO_EXP05														
LSO_EXP06														
LSO_EXP07														
LSO_EXP08														
LSO_EXP09														
LSO_EXP10														



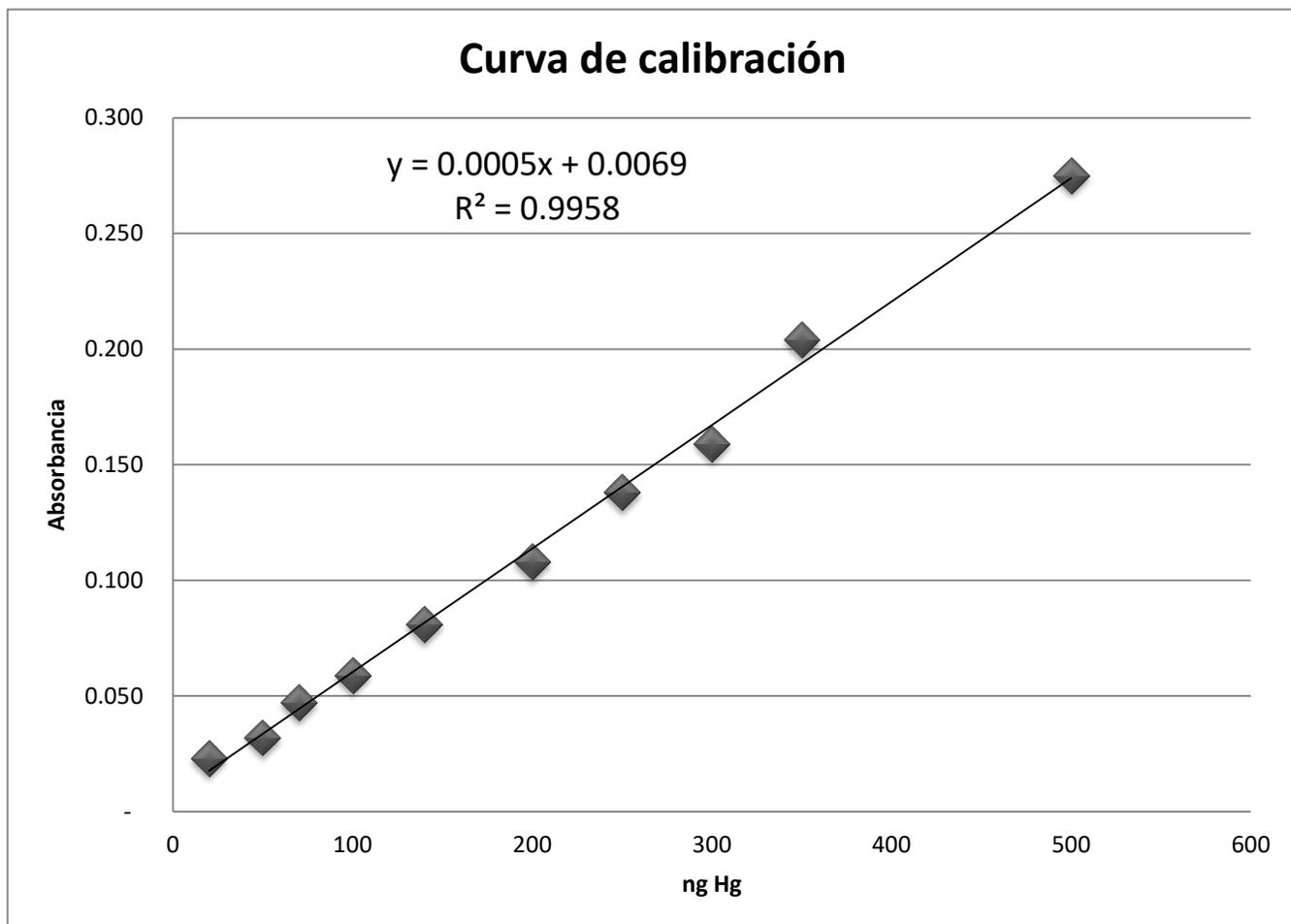
ANEXO IV FORMATO DE LIBRETA DE CAMPO

 <p>INECC INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO</p>		<p>MUESTREO MINA "LA SOLEDAD"</p> <p>LIBRETA DE CAMPO</p> <p>ELABORADO POR : I.Q. DAVID F HUERTA COLOSIA</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA - UNAM</p> <p>POSGRADO DE INGENIERÍA AMBIENTAL</p> <p>INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO INECC</p>										 <p>UNAM POSGRADO Ingeniería</p>			
		CLAVE MUESTRA		FECHA		HORA									
		RESPONSABLE DE TOMA DE MUESTRA				X		Y							
		UBICACIÓN													
pH		Temp. Ambiente		Humedad relativa		Vel. Del viento		Temp. Suelo		Conductividad					
PRESENCIA DE VEGETACIÓN		USO DEL SUELO		INFRAESTRUCTURA											
PRESENCIA DE RESIDUOS O MATERIAL DE RELLENO															
CARACTERÍSTICAS DEL SUELO															
Textura		Color		Presencia de humedad		Presencia de hojarasca		Otros materiales eliminados							

ANEXO II. CURVAS DE CALIBRACIÓN PARA ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA

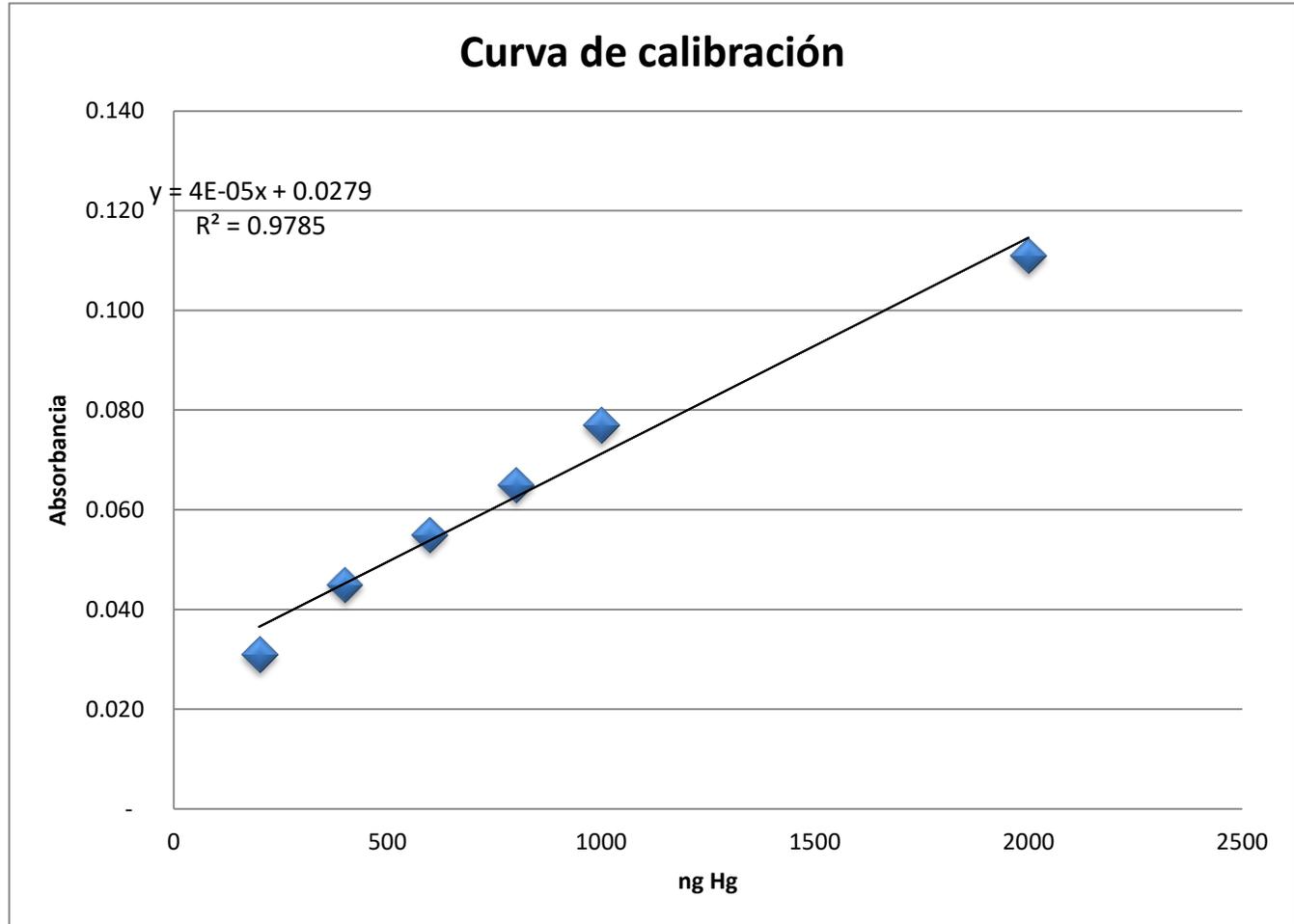
Curva de calibración, abril 2019.	
ng	abs
20	0.023
50	0.032
70	0.047
100	0.059
140	0.081
200	0.108
250	0.138
300	0.159
350	0.204
500	0.275

Límite de detección
0.0159
Límite de cuantificación
0.0530
Desviación Estándar
0.00529622



Curva de calibración, agosto 2019.	
ng	abs
200	0.031
400	0.045
600	0.055
800	0.065
1000	0.077
2000	0.111

Límite de detección
0.0083
Límite de cuantificación
0.0276
Desviación Estándar
0.00275624



REFERENCIAS

- Amoles, G. M. (05 de 05 de 2019). Medio físico. Pinal de Amoles, Querétaro, México. Obtenido de <http://www.pinaldeamoles.gob.mx/index.php/el-municipio/medio-fisico>
- Artisanal Gold Council. (2014). Health Issues in Artisanal and Small-Scale Gold Mining. Training for Health Professionals. (AGC, Ed.) *Version 1*. Recuperado el 7 de Octubre de 2015, de http://www.unep.org/chemicalsandwaste/Portals/9/Mercury/Documents/ASGM/Health_Training_Oct2014_version1.0_eng_lowQ.pdf
- ATSDR. (Marzo de 1999). *Toxicological Profile for Mercury*. Obtenido de <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp46.pdf>
- ATSDR. (06 de Mayo de 2016). *Resúmenes de Salud Pública - Mercurio (Azogue) (Mercury)*. Obtenido de https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_ph46.html
- ATSDR. (11 de abril de 2019). Curso de Toxicología para comunidades. *Rutas de Exposición*. EUA. Obtenido de https://www.atsdr.cdc.gov/es/training/toxicology_curriculum/modules/2/es_lecturenotes.html#:~:text=La%20ATSDR%20define%20una%20vía,una%20vía%20de%20exposición%20completa.
- Bose-O'Reilly, S., Kathleen, M., Nadine, S., & Beate, L. (2010). Mercury Exposure and Children's Health. (N. I. Health, Ed.) Obtenido de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3096006/#R227>
- Camprubi, A., Ferrari, L., Costa, M., Cadillac, E., & Canals, A. (2003). Ages of Epithermal Deposits in Mexico: Regional Significance and Links with the Evolution of Tertiary Volcanism. *Economic Geology*, 96(5), 1029-1037.
- Casas, S. E. (2002). *Química bioinorgánica*. Madrid: Editorial Síntesis.
- Castro, J. (2011). *Informe sobre el mercado del mercurio en México*. Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte.
- Choi, A., & et.al. (2008). Methylmercury exposure and health effects in humans. *Environment Chemistry*, 112-120.
- Counter, S., & Buchanan, L. (2004). Mercury exposure in children: a review. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 209-230.

- Diaz-Barriga, F. (2017). *Componente 5: Medidas para la implementación temprana del Convenio de Minamata*. INECC, Coordinación de Contaminación y Salud Ambiental, Ciudad de México, Mexico.
- Dirección General de Desarrollo Minero. (2013). *Guía de Procedimientos Mineros*. Ciudad de México.
- Drasch, G., Horvat, M., Stoeppler, M., Merian, E., Anke, M., & Ihnat, M. (2004). Elements and their compounds in the environment. *Wiley-VHC Verlag*, 931-1005.
- FAO/WHO. (2004). *Evaluation of certain food additives and contaminants*. Geneva: WHO.
- Federación de Ataxias de España*. (s.f.). Obtenido de <http://fedaes.org/que-es-la-ataxia/>
- Flores, F. (14 de Abril de 2014). Explotación ilegal de mercurio, actividad para la sobrevivencia. *El Financiero-Economía*.
- General, C. (2007). *Standard for contaminants and toxins in foods CODEX STAN 1993-1995*. FAO.
- Government of Canada. (09 de Julio de 2013). Obtenido de Mercury: biogeochemistry: <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/pollutants/mercury-environment/about/biogeochemistry.html>
- Grupo de Estudio para el Medio Ambiente Global y la Economía. (1991). *Contaminación en Japón-Nuestras experiencias trágicas*. Tokio.
- Holmes, P., & et.al. (2009). Is low-level environmental mercury exposure of concern to human health? *Science of the Total Environment*, 171-182.
- INECC. (2001). *La contaminación por mercurio en México*. Obtenido de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/438/cap2.html>
- INECC. (2017). *Informe final, Generar información cualitativa y cuantitativa de las fuentes minero-metalúrgicas en México*. Informe, Servicio Geológico Mexicano, Coordinación de Contaminación y Salud Ambiental.
- Instituto Nacional de Antropología e Historia. (2016). Obtenido de <http://www.inah.gob.mx/es/boletines/5349-estudios-revelan-los-efectos-de-la-mineria-prehispanica-en-toluquilla>
- Khandaker, R., & et.al. (2018). Are the existing guideline values adequate to protect soil health from inorganic mercury contamination? *Environmental International*, 10-15.

- Kirk, R. E., & Othmer, D. F. (1967). *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* (Vol. 16). New York.
- Lambert, e. a. (2012). Integrating mercury science and policy in the marine context: challenges and opportunities. *Environ Res.*, 119, 132-142.
- Levresse, G., Tritlla, J., Corona Esquivel, R., & Pinto Linares, P. (2008). *Los yacimientos de mercurio*. FOMIX, Querétaro.
- Ley de Inversión Extranjera. (27 de Diciembre de 1993). México.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. (28 de Enero de 1988). *LGEEPA*. México.
- Lyman, S., & et.al. (2007). Estimation of Dry Deposition of Atmospheric Mercury in Nevada by Direct and Indirect Methods. *Environmental Science Technology*, 1970-1976.
- Lyman, S., & et.al. (s.f.). Estimation of Dry Deposition of Atmospheric Mercury in Nevada by Direct and Indirect Methods.
- Lyn, P. (2002). Mercury Toxicity and Antioxidants: Part I: Role of Glutathione and alpha-Lipoic Acid in the Treatment of Mercury Toxicity. *Alternative Medicine Review*, 456-471.
- Mendioroz, S. (2001). *Mercurio*. Madrid: Instituto de Catálisis y Petroleoquímica del CSIC.
- Minera, L. (11 de Agosto de 2014). Diario Oficial de la Federación. México.
- Ministerio del Medio Ambiente de Japón. (2013). *Enseñanzas de la Enfermedad de Minamata y el Manejo del Mercurio en Japón*. Obtenido de https://www.env.go.jp/chemi/tmms/pr-m/mat01/es_full.pdf
- Morales-Ávila, V. (2008). *Estudio de inclusiones fluidas de los yacimientos de mercurio en el área de Guadalcázar, S.L.P.* Universidad Autónoma de San Luís Potosí.
- Moreira, J. C. (1996). Threats by heavy metals: human and envirnmental contamination in Brazil. *The Science of the Total Environment*, 61-71.
- Otero, G. T. (2009). El artículo 133 y la jerarquía jurídica en México. En U. Facultad de Derecho, *Curso de actualización de profesores de derecho internacional privado*.
- Peñamiller, M. d. (2018). *Juntos por Peñamiller*. Recuperado el 1 de 08 de 2019, de <http://www.penamiller.gob.mx/nuestro-municipio.html>

- PNUMA. (2015). *Instrumental para la identificación y cuantificación de liberaciones de mercurio, Informe de referencia y guía para la elaboración de inventario nivel 2, Versión 1.3*. Documento Técnico, Productos químicos, Ginebra, Suiza.
- PNUMA. (Septiembre de 2017). *Convenio de Minamata sobre el mercurio, Texto y Anexos*.
- PNUMA. (2017). *Convenio de Minamata Sobre el Mercurio, Texto y Anexos*. Recuperado el Septiembre de 2018, de www.mercuryconvention.org
- Querétaro, P. E. (05 de Mayo de 2019). Pinal de Amoles Historia. Querétaro, Querétaro, México. Obtenido de <http://www.queretaro.gob.mx/municipios.aspx?q=RrRbGx+QAUg4/z1YkdmmFQ==>
- Querétaro, S. d. (05 de Mayo de 2019). Regiones Sierra Gorda. Querétaro, México. Obtenido de <http://www.queretaro.travel/es/region/7/sierra-gorda/>
- Rangel-García, M. (2015). *Cuantificación de Hg en agua para el consumo humano provenientes de pozos en la región minera de Taxco de Alarcón, Guerrero*. Ciudad de México.
- Reglamento de la Ley Minera. (12 de Octubre de 2012). México.
- Risher, J. (2003). *The Concise International Chemical Assessment Document Series*. Geneva: World Health Organization. Obtenido de <http://www.who.int/ipcs/publications/cicad/en/cicad50.pdf>.
- Secretaría de Economía. (17 de Marzo de 2016). *Competitividad y Normatividad*. Obtenido de <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/competitividad-y-normatividad-normalizacion>
- SGM. (2017). *Generar información cualitativa y cuantitativa de las fuentes minero-metalúrgicas en México*. Subgerencia de evaluación geohidrológica.
- Solenkova, N., & et al. (2014). Metal pollutants and cardiovascular disease: mechanisms and consequences of exposure. *Am Heart J*, 812-822.
- Soria, L. (1999). *Metodología para la prevención de accidentes y daños a la salud y al ambiente ocasionados por mercurio o sus compuestos*. Ciudad de México: CENAPRED.
- Statista. (Febrero de 2018). Obtenido de <https://www.statista.com/statistics/587342/mine-production-of-mercury-worldwide/>
- Syversen, T., & Kaur, P. (2012). The toxicology of mercury and its compounds. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 215-226.

- UNEP. (2013). *Global Mercury Assessment 2013. Sources, Emissions and Environmental Transport*. Geneva, Switzerland: UNEP Chemicals Branch.
- UNEP. (2013). *Technical Background Report for the Global Mercury Assessment*. Suiza: AMAP Secretariat.
- USEPA. (29 de Diciembre de 2014). *Mercury. Health Effects*. Recuperado el Agosto de 2018, de <http://www.epa.gov/mercury/effects.htm>
- USEPA. (30 de Julio de 2018). *Información Básica sobre el mercurio*. Obtenido de <https://espanol.epa.gov/espanol/informacion-basica-sobre-el-mercurio>
- WHO. (2004). *Guidelines for drinking-water quality*. Geneva: World Health Organization.
- WHO. (2006). *Air Quality Guidelines, global update 2005*. Copenhagen: Word Health Organization.
- Wiley and Sons, J. (2001). *The Merck Index*. New York.
- Zepeda, H. R. (2017). *Acciones para la protección de la salud humana y el medio ambiente en la identificación de poblaciones vulnerables debido a la exposición de mercurio*. Querétaro.