



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
METALURGIA

ESTUDIO DE PM_{10} Y METALES (Cu, Fe, Mn, Pb) EN AIRE AMBIENTE, EN LA REGIÓN DE CANANEA, SONORA, MÉXICO.

Tesis

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presenta

Tania Sofía Martínez Martínez

Hermosillo, Sonora.

Junio 2019

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

DEDICATORIA

A mis Padres:

Por todo el apoyo y comprensión que me han brindado, se el esfuerzo que realizaron y todo el sacrificio que pusieron en mi a fin de que me convirtiera en una buena persona, les aseguro que su trabajo no ha sido en vano y este es el comienzo de muchos más logros que no son más que de ustedes. Se los dedico con todo mi amor, los amo.

A mi hermano:

Te agradezco todo tu cariño y apoyo, créeme que tus ocurrencias e historias me sacaron una sonrisa cuando más lo necesité, este logro es en parte gracias a ti, te amo.

A mis amigos:

Gracias por estos años de estudio, risas y hasta preocupaciones, ustedes entienden todo el trabajo y esfuerzo que nos permitió estar aquí, su compañía y apoyo me ayudaron en todo momento y cada uno de ustedes me aportó algo muy bonito que guardo en mi corazón, los quiero.

Alberto:

Te agradezco todo tu apoyo durante estos últimos años, eres una pieza fundamental para que me encuentre terminando esta etapa, aprecio todos tus consejos, tu cariño incondicional y la motivación que me diste en los momentos cuando más lo necesité.

Espero poder regresarte un poco de todo el cariño y apoyo que me has dado, te amo.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de Tesis, muchas gracias, por su paciencia, disposición y por permitirme ser parte de este proyecto, espero haber aprovechado al máximo todas sus enseñanzas.

A mis sinodales, gracias por sus observaciones sé que fueron con el único fin de transmitirme sus conocimientos y permitirme mejorar como estudiante, cada uno de ustedes me aportó con su experiencia enseñanzas invaluable.

A todas las personas que formaron parte del proyecto, muchas gracias por transmitirme sus conocimientos, por su paciencia y ayuda durante la realización de este.

A la Universidad de Sonora, que en sus instalaciones y con su personal docente me formaron como la profesionista que soy, puedo decir que me siento orgullosa de mi alma mater.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
RESUMEN.....	xi
I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	13
I.1. Introducción.....	13
I.2. Objetivos.....	15
I.2.1. Objetivo General.....	15
I.2.2. Objetivos Específicos.....	15
I.3. Hipotesis.....	16
I.3.1. Hipótesis de Trabajo.....	16
I.3.2. Hipótesis de Nulidad.....	16
II. ANTECEDENTES.....	17
II.1. Calidad del Aire.....	17
II.2. Fuentes de Contaminación del Aire.....	18
II.3. Tipos de Contaminantes del Aire.....	19
II.3.1. Material Particulado (PM ₁₀).....	21
II.3.2. Metales Potencialmente Tóxicos (MPT).....	21
II.4. Comportamiento del Material Particulado PM ₁₀ , y Metales (Cu, Fe, Mn, Pb) con Respecto a Parámetros Climatológicos (Temperatura, Precipitación, Humedad Relativa, Velocidad del Aire).....	22
II.5. Efectos a la Salud por la Contaminación del Aire.....	23
II.5.1. Material Particulado (PM ₁₀).....	24
II.5.2. Metales (Cu, Fe, Mn, Pb).....	25

II.6. Valores Máximos Permisibles de Calidad del Aire	27
II.6.1. Valores Máximos Permisibles para Material Particulado (PM ₁₀).....	28
II.6.2. Valores Máximos Permisibles para Metales Potencialmente Tóxicos (Cu, Fe, Mn, Pb)	29
II.7. Criterio de Días de Buena, Regular y Mala Calidad del Aire	31
II.8. Estudios Realizados de Calidad del Aire en Algunos Estados de México	32
II.9. Área de Estudio	35
II.9.1. Localización del Área de Estudio	35
II.9.2. Cananea, Sonora, México	36
III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	39
III.1. Frecuencia y Procedimiento de Colecta de Muestras de Aire	39
III.2. Operación de las Estaciones de Monitoreo	40
III.2.1. Preparación de los Filtros (acondicionamiento) para la Colecta de las Muestras de Aire	40
III.2.2. Determinaciones Analíticas: Material Particulado PM ₁₀ , Metales (Cu, Fe, Mn, Pb)	41
III.3. Control de Calidad en el Muestreo y Análisis de las Muestras de Filtros.....	44
III.3.1. Criterio de Cobertura de Datos	44
III.3.2. Preparación y Limpieza del Material de Cristalería.....	45
III.3.3. Almacenamiento y Transporte de las Muestras (Filtros).....	45
III.4. Indicadores de Calidad de los Datos	46
III.4.1. Blancos de Campo, Laboratorio y Equipo.....	46
III.4.2. Precisión	47

III.4.3. Exactitud	48
III.4.4. Detección del Instrumento (L.D.)	49
III.5. Normas de Calidad y/o Criterios de Calidad del Aire, Utilizados en la Presente Investigación	50
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
IV.1. Material Particulado PM ₁₀	51
IV.1.1. Comportamiento Trimestral para las Concentraciones de PM ₁₀	51
IV.1.2. Comportamiento de los Promedios Mensuales de PM ₁₀	58
IV.1.3. Comportamiento del Promedio Anual.....	59
IV.1.4. Días de Buena, Regular y Mala Calidad del Aire Respecto de PM ₁₀	60
IV.1.5. Comparativo con Respecto a otros Monitores de la Región de Cananea en Muestreo Trimestral de PM ₁₀	61
IV.2. Metales Potencialmente Tóxicos (Cu, Fe, Mn, Pb)	65
IV.2.1. Comportamiento de las Concentraciones de Metales	65
IV.2.2. Comparación de las Concentraciones de Metales con los Límites Permisibles	66
IV.3. Comparación de los Resultados Obtenidos con Respecto a Estudios Similares a Nivel Regional, Nacional e Internacional	69
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
V.1. Conclusiones	73
V.2. Recomendaciones	74
ANEXOS	75
BIBLIOGRAFÍA	87

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Comparativo del tamaño de las PM ₁₀ y PM _{2.5} con el diámetro del cabello humano.....	24
Figura 2. El estado de la calidad del aire en México.	32
Figura 3. Área de estudio y ubicación del monitor Cerro de Antenas.	35
Figura 4. Muestreador de Alto Volumen (Hi-Vol).....	39
Figura 5. Comportamiento de la concentración de PM ₁₀ durante el Trimestre 1 (enero a marzo de 2017) en el monitor Cerro de Antenas.	53
Figura 6. Direcciones de procedencia de los vientos durante el Trimestre 1 (enero, febrero, marzo).	53
Figura 7. Comportamiento de la concentración de PM ₁₀ durante el Trimestre 2 (abril a junio de 2017) en el monitor Cerro de Antenas.	54
Figura 8. Direcciones de procedencia de los vientos durante el Trimestre 2 (abril, mayo, junio).....	55
Figura 9. Comportamiento de la concentración de PM ₁₀ durante el Trimestre 3 (julio a septiembre de 2017) en el monitor Cerro de Antenas. ...	56
Figura 10. Direcciones de procedencia de los vientos durante el Trimestre 3 (julio, agosto, septiembre).	56
Figura 11. Comportamiento de la concentración de PM ₁₀ durante el Trimestre 4 (octubre, noviembre, diciembre de 2017) en el monitor Cerro de Antenas.	57
Figura 12. Direcciones de procedencia de los vientos durante el Trimestre 4 (octubre, noviembre, diciembre).....	58
Figura 13. Días de Buena, Regular y Mala Calidad del Aire por Trimestre en el Monitor Cerro de Antenas.....	60

Figura 14. Días de Buena, Regular y Mala Calidad del Aire durante el ciclo Anual 2017.	61
Figura 15. Ubicación de las estaciones de monitoreo en la Cd. de Cananea, Sonora, y en el Complejo Minero.	62
Figura 16. Comportamiento de la concentración de PM ₁₀ durante el ciclo anual 2017, para los cuatro monitores ubicados en la región de Cananea, Son.	64
Figura 17. Comportamiento de las concentraciones de Cobre durante el muestreo anual (2017).	66
Figura 18. Comportamiento de las concentraciones de Hierro durante el muestreo anual (2017).	67
Figura 19. Comportamiento de las concentraciones de Manganeso durante el muestreo anual (2017).	68

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla I. Composición del aire seco en la parte más baja de la tropósfera.	18
Tabla II. Clasificación general de los contaminantes gaseosos del aire	20
Tabla III. Síntomas respiratorios por la Contaminación del Aire en México (2010).....	24
Tabla IV. Efectos de la presencia de Plomo en la sangre humana.....	27
Tabla V. Meses incluidos por trimestre	29
Tabla VI. Normas y criterios para estimar la calidad del aire ambiente.....	30
Tabla VII. Color, calificativo e intervalo de concentración para PM ₁₀	31
Tabla VIII. Evaluación del Criterio de Cobertura de datos para muestreo de PM ₁₀ , realizado en el Monitor Cerro de Antenas durante el ciclo anual 2017.	45
Tabla IX. Máximos, mínimos y número de veces fuera del límite permisible diario por trimestre para el monitor Cerro de Antenas.....	52
Tabla X. Promedio de concentraciones mensuales para PM ₁₀ en monitor Cerro de Antenas.	59
Tabla XI. Número de veces fuera del límite diario normado para PM ₁₀ por estación de monitoreo en la región de Cananea, Sonora.	63
Tabla XII. Comparación de los resultados obtenidos del monitor Cerro de Antenas con los de otras ciudades a nivel regional, nacional e internacional.....	72

RESUMEN

En la presente investigación se evaluó la calidad del aire para la Región de Cananea, Sonora, México, respecto de Material Particulado menor o igual a 10 micras (PM_{10}) y metales pesados (Cu, Fe, Mn y Pb) para el periodo anual 2017. La presente investigación fue realizada en la estación de monitoreo ubicada en el Cerro de Antenas, dentro del complejo minero de Cananea, Sonora.

La muestreo se realizó basándose inicialmente en la Norma Oficial Mexicana NOM-035-ECOL-1993 (DOF, 1993), coincide con lo establecido por el Apéndice B del título 40 del Código de Regulaciones Federales de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 1992).

Se realizó la comparación y el análisis de los resultados de la concentración material particulado (PM_{10}) en base al límite permisible establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, el cual es $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio a 24 horas y $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ anual; asimismo, se analizaron los días de Buena, Regular y Mala calidad del aire según lo especificado en el Informe Nacional de Calidad del Aire (SEDEMA, 2017).

Se obtuvieron las concentraciones de los metales del presente estudio, utilizando la técnica de espectroscopía de absorción atómica y se compararon los resultados con los límites establecidos en Normas Mexicanas y Criterios Internacionales.

Los límites máximos permisibles para metales se basaron en lo establecido por el Ministerio de Medio Ambiente de Ontario (OME), donde para el cobre es de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, hierro $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y manganeso $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un periodo de 24 horas, el caso del plomo se tomó como referencia la Norma Mexicana NOM-026-SSA1-1993, con el límite de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un periodo de tres meses como promedio aritmético. Para el Material Particulado PM_{10} , se tuvieron concentraciones dentro del límite diario normado en un 77% de los días muestreados, sin embargo el promedio anual ($52.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$), sobrepasó lo establecido en la NOM-025-SSA1-2014. Para los metales cobre, manganeso y plomo, las concentraciones monitoreadas se

encontraron muy por debajo de los límites de comparación permisibles, y en el caso del plomo las concentraciones detectadas fueron menores al límite de detección de la técnica de Espectroscopía de Absorción Atómica, sin embargo el metal hierro, en dos ocasiones sobrepasó su límite máximo permisible, la primera vez el 12 de abril, con $4.421 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la segunda el día 17 de junio

Se acepta parcialmente la hipótesis de trabajo, la cual establecía que las concentraciones de material particulado menor a 10 micras (PM_{10}) y Metales (Cu, Fe, Mn, Pb) en el aire ambiente de la Ciudad de Cananea, Sonora, México, rebasarían los máximos permisibles dando como resultado una mala calidad del aire para el periodo anual 2017, se considera mala la calidad del aire del aire con respecto al límite diario y al límite anual de PM_{10} ; mientras que para los metales Cu, Mn y Pb, los niveles de concentración en el aire ambiente son aceptables y satisfactorios puesto que en ninguna ocasión se rebasó el límite máximo, únicamente en el caso del Fe se considera que incumple.

,

I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

I.1. Introducción

Según datos de la Secretaría de Economía del Estado, Sonora es el principal productor de cobre, grafito, wollastonita y antracita, además de ser el único productor de molibdeno del país. Sonora produce el 24% del oro del país, es un importante productor de plata, hierro y minerales no metálicos como: barita, sílica, yeso, sal y zeolitas (SEES, 2015).

Desde hace muchos años, el Estado de Sonora ha ocupado el primer lugar dentro de los principales estados mineros productores, debido principalmente a la explotación de las dos minas más grandes del país como son Cananea y La Caridad. La mina de Cananea realiza una explotación de mineral de cobre mediante la técnica a cielo abierto o también llamada tajos a cortas, este tipo de extracción se basa en la excavación del terreno, ya sea por medios mecánicos o mediante el uso de voladuras controladas (SGM, 2014).

Las minas a cielo abierto son de gran rentabilidad económica; sin embargo, desde el punto de vista ecológico se reconoce su impacto negativo en el Medio Ambiente. Entre sus aspectos más dañinos son los amplios espacios requeridos para su explotación y el daño al suelo utilizado, quedando espacios desfigurados por la acción mecánica, pérdida de la flora y fauna del ecosistema, así como el deterioro o disminución de la estética del paisaje (FyMAA, 2015)

Además de los daños al Medio Ambiente, la actividad minera puede acarrear problemas de salud a las poblaciones vecinas, puesto que es un gran generador de contaminantes por diversas rutas. En un sitio minero, las principales rutas de exposición a contaminantes pueden ser el material particulado en el aire; el suelo contaminado (por el polvo generado desde la mina, por el material proveniente de los jales o por la deposición del material particulado del aire); el polvo

contaminado e inclusive, dependiendo del área geográfica, la contaminación de cuerpos de agua por el lavado de jales o de suelos contaminados (Mejía et al., 1999).

La contaminación del aire se da a través del transporte de las emisiones generadas durante todas las etapas del ciclo de una mina. Las operaciones mineras movilizan grandes cantidades de material, asimismo las pilas de desecho contienen partículas que pueden ser fácilmente dispersadas por el viento (AMDA, 2010).

Según la Guía para la evaluación de proyectos mineros de la Alianza Mundial de Derecho Ambiental, las mayores fuentes de contaminación del aire en zonas mineras son: el material particulado resultado de excavaciones, voladuras, el transporte de materiales y polvos fugitivos, y la quema de combustibles provenientes de fuentes estacionarias y móviles (AMDA, 2010).

I.2. Objetivos

I.2.1. Objetivo General

Realizar una caracterización con respecto a partículas menores a 10 micras (PM_{10}) y metales (Cu, Fe, Mn, Pb), en aire ambiente en la región de Cananea, Sonora, México, durante un ciclo anual.

I.2.2. Objetivos Específicos

- a. Realizar los análisis físicos y químicos de las muestras de aire (filtros) para determinar las concentraciones de PM_{10} colectados en el monitor Cerro de Antenas durante un ciclo anual (2017).
- b. Realizar la preparación y el análisis de las muestras de aire (filtros) para la determinación de la concentración de metales (Cu, Fe, Mn, Pb), colectado en el monitor Cerro de Antenas.
- c. Evaluar la calidad de Aire Ambiente con respecto a partículas menores a 10 micras (PM_{10}) y metales (Cu, Fe, Mn, Pb), en base a la Normatividad Mexicana vigente en el monitor Cerro de Antenas, durante un ciclo anual (2017).
- d. Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos tanto de material particulado (PM_{10}), como de metales, respecto a otras ciudades a nivel estatal, nacional e internacional.

I.3. Hipotesis

I.3.1. Hipótesis de Trabajo

Las concentraciones de material particulado menor a 10 micras (PM_{10}) y metales (Cu, Fe, Mn, Pb) en el aire ambiente de la Ciudad de Cananea, Sonora, México, rebasaron los máximos permisibles dando como resultado una mala calidad del aire para el periodo anual 2017.

I.3.2. Hipótesis de Nulidad

La calidad del aire en la región de Cananea, Sonora, México, respecto de material particulado menor a 10 micras (PM_{10}) y metales (Cu, Fe, Mn, Pb) para el periodo anual 2017 fue satisfactoria.

II. ANTECEDENTES

II.1. Calidad del Aire

Los componentes principales del aire son: nitrógeno, oxígeno y argón, los cuales no reaccionan entre sí bajo circunstancias normales, asimismo, las pequeñas cantidades de helio, neón, criptón, xenón, hidrógeno y óxido nitroso tienen poca o ninguna interacción con otras moléculas (Tabla I). Cualquier alteración en la composición del aire, es considerada como una afectación a la calidad del aire y esto se denomina contaminación (Strauss y Mainwaring, 1990).

La disminución de la calidad del aire es un tema de gran importancia en cuanto a salud pública y tanto su control como el cumplimiento de los límites máximos permisibles es responsabilidad de las industrias generadoras de desechos contaminantes, así como de los gobiernos locales. El monitoreo, junto con los inventarios de emisiones, son las herramientas básicas para la atención de los problemas de calidad de aire (Zuk, 2007).

El no cumplir con los estándares de calidad en aire está relacionado con efectos a la salud tales como enfermedades respiratorias, cardiovasculares, reproductivas, neurológicas, cáncer, mortalidad prematura, entre otras (SEDEMA, 2017).

Tabla I. Composición del aire seco en la parte más baja de la tropósfera.

Gases	Símbolo químico	Concentración	Tiempo de residencia calculado
Gases principales (%)			
Nitrógeno	N ₂	73	Continuo
Oxígeno	O ₂	20.9	Continuo
Argón	Ar	0.93	Continuo
Dióxido de carbono	CO ₂	0.032	20 años
Gases raros (ppm)			
a) Gases permanentes			
Helio	He	5.2	Continuo
Neón	Ne	18	Continuo
Xenón	Xe	1.1	Continuo
Criptón	Kr	0.086	Continuo
Hidrógeno	H ₂	0.5	-
Óxido nitroso	N ₂ O	0.25	8-10 años
b) Gases reactivos			
Monóxido de carbono	CO	0.1	0.2-0.3 años
Metano	CH ₄	1.4	< 2 años
Hidrocarburos excepto el metano		0.02	-
Óxido nítrico	NO	0.2 a 2x10 ⁻³	2-8 días
Dióxido de nitrógeno	NO ₂	0.5 a 4x10 ⁻³	2-8 días
Amoniaco	NH ₃	6 a 20x10 ⁻³	1-4 días
Dióxido de azufre	SO ₂	0.03 a 1.2x10 ⁻³	1-6 días
Ozono	O ₃	0 a 0.05	-

Fuente: Strauss y Mainwaring (1990)

II.2. Fuentes de Contaminación del Aire

Existen dos fuentes principales de contaminación del aire:

- Naturales: que son los contaminantes generados a partir de fuentes naturales, tales como polvos, humos, pulverización de agua marina, gases sulfurosos, polen, incendios, etc.

- Antropogénicas: son los contaminantes derivados de las actividades realizadas por el hombre: por ejemplo, la combustión; la cual se puede dar como resultados de procesos de generación de energía eléctrica, las emisiones de vehículos o los procesos industriales de calentamiento y tueste; la minería, los procesos químicos, procesos nucleares, entre otras actividades (Universidad de Oviedo, 1998).

Es necesario tomar medidas normativas por parte de los gobiernos locales, y de sus respectivas dependencias, con el fin de controlar las emisiones de contaminantes por parte de las industrias y de la población en general.

II.3. Tipos de Contaminantes del Aire

El tipo de contaminantes presentes en el aire y la calidad de éste, se encuentran relacionados por diversos factores, por ejemplo, ciertos eventos meteorológicos, el clima, las características geográficas y por supuesto las fuentes de emisión (Wark y Warner, 1996).

En la atmósfera existe un compendio de compuestos que contribuyen con la contaminación del aire, dichos contaminantes se presentan enumerados en el siguiente listado:

1. Material particulado.
2. Compuestos que contienen azufre.
3. Compuestos orgánicos.
4. Compuestos que contienen nitrógeno.
5. Monóxido de carbono.
6. Compuestos halogenados.
7. Compuestos radiactivos.

Los contaminantes enumerados anteriormente se pueden clasificar en dos categorías: primarios y secundarios. Los contaminantes primarios se denominan como tal, debido a que su origen es directo de alguna fuente de contaminación, por ejemplo, los óxidos de azufre, el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, partículas e hidrocarburos; cuyo origen son la quema de combustibles fósiles, la combustión del azufre, la producción de fertilizantes, el uso de solventes químicos, entre otros (Wark y Warner, 1996).

Por su parte los contaminantes secundarios, son originados en el aire, como consecuencia de la transformación y las reacciones químicas que sufren los contaminantes primarios en la atmósfera, algunos ejemplos de éstos son el ozono, la lluvia ácida y los contaminantes fotoquímicos (SEMARNAT, 2013).

En la Tabla II, se presenta un resumen de los tipos de contaminantes, clasificados según su origen y clase (Wark y Warner, 1996).

Tabla II. Clasificación general de los contaminantes gaseosos del aire

Clase	Contaminantes primarios	Contaminantes secundarios
Compuestos que contienen azufre	SO ₂ , H ₂ S	SO ₃ , H ₂ SO ₄ , MSO ₄
Compuestos orgánicos	Compuestos de C ₁ -C ₅	Cetonas, aldehídos, ácidos
Compuestos que contienen nitrógeno	NO, NH ₃	NO ₂ , MNO ₃
Óxidos de carbono	CO, (CO ₂)	Ninguno
Halógeno	HCl, HF	Ninguno

Fuente: Wark y Warner (1990).

M= Grupos metal.

II.3.1. Material Particulado (PM₁₀)

Un tipo de contaminante primario es el material particulado, el cual se define como el material respirable presente en la atmósfera en forma sólida o líquida, por ejemplo, el polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento y polen, entre otras. De acuerdo con su tamaño se pueden dividir en dos grupos principales: las de diámetro aerodinámico igual o inferior a 10 μm (PM₁₀) y las de fracción respirable más pequeña, igual o inferior a 2.5 μm (PM_{2.5}) (SEMARNAT, 2013). El material particulado (PM) es un indicador representativo de la contaminación en el aire, el cual está constituido comúnmente de sulfatos, nitratos, amoníaco, cloruro de sodio, hollín, polvos minerales y agua (OMS, 2018).

Es común reportar las mediciones de la calidad del aire como concentraciones medias diarias o anuales de partículas (PM₁₀) por metro cúbico (m³) de aire, ya que este tamaño de partícula tiene efectos sobre la salud (Salini et al., 2017), debido a la tendencia a la penetración y permanencia en el sistema respiratorio y que en altas concentraciones poseen propiedades carcinogénicas, pudiendo ocasionar trastornos en la salud humana (Raabe, 1999).

II.3.2. Metales Potencialmente Tóxicos (MPT)

Los metales pesados potencialmente tóxicos son elementos muy peligrosos, esto debido a sus características de bioacumulación, biomagnificación y su alta toxicidad, lo que genera que se encuentren por largos periodos en el sistema y que su degradación de manera natural sea más complicada (Rodríguez, 2017). No existe una definición concreta para describir a los MPT, sin embargo es conveniente referirse a ellos como un grupo de elementos que por lo general son de carácter metálico o semimetálico, los cuales suelen tener una densidad comprendida entre 4 g/cm³ y 6 g/cm³ aproximadamente, además de ser elementos con un elevado peso atómico y una alta masa atómica (Ruíz, 2010).

II.4. Comportamiento del Material Particulado PM₁₀, y Metales (Cu, Fe, Mn, Pb) con Respecto a Parámetros Climatológicos (Temperatura, Precipitación, Humedad Relativa, Velocidad del Aire)

Los principales métodos de transporte para contaminantes en el medio ambiente son a través del aire, agua, suelos, y la biota. Las partículas atmosféricas suspendidas pueden jugar un papel importante en el transporte de contaminantes ambientales, en particular aquellos que son poco volátiles y poseen baja solubilidad acuosa. El transporte por partículas atmosféricas es un sendero importante por el cual los contaminantes pueden ser redistribuidos en el entorno a partir de puntos de origen como fundiciones mineras, grandes centros industriales o a través de entornos urbanos (Csavina et al., 2012). Este mecanismo de transporte es importante tenerlo en consideración ya que con el creciente aumento de las actividades del uso de suelos, tales como la minería y la agricultura; así como el cambio climático, es una de las vías de más alta transferencia de contaminantes atmosféricos (Pelletier, 2006). Por ejemplo, la frecuencia de las tormentas de arena y la intensidad de estas ha ido aumentando durante las décadas más recientes, esto es un fenómeno que se ha observado alrededor del mundo en lugares como África, Australia, y China. En gran parte debido al aumento de las actividades humanas y los cambios climáticos (Middleton et al., 1986; Tegen y Fung, 1995).

Factores ambientales, como la humedad atmosférica y la humedad del suelo superficial, pueden afectar la velocidad de fricción en la cual las partículas comienzan a separarse de la superficie y a hacerse disponibles para ser transportadas por el viento. Como la humedad del suelo en muchas regiones áridas y semiáridas se encuentra en equilibrio con la humedad atmosférica, la humedad relativa tiene una gran influencia sobre las fuerzas que influyen en la velocidad de fricción del suelo, causando una relación compleja entre la humedad relativa, el tamaño de partícula y esto puede ayudar a la erosión del suelo

(Stockton y Gillette, 1990). La vegetación y otros elementos que cubren la superficie del suelo le proporcionan características de menor erosión, ya que absorben parte de la fuerza del viento sobre las partículas del suelo, evitando que estas sean despegadas de él con mayor facilidad (Stockton y Gillette, 1990).

II.5. Efectos a la Salud por la Contaminación del Aire

Considerando todos los principales medios de transporte de contaminantes, y analizándolos en base al riesgo potencial que representan a la salud humana y el entorno, el transporte de contaminantes por aire, es quizás el más notable debido a la velocidad potencial, la distancia, y la extensión aérea en la cual pueden ser transportados en el Medio Ambiente (Csavina et al., 2012). De acuerdo con estudios epidemiológicos realizados por la Secretaría de Salud en México, la ocurrencia de una contingencia atmosférica provoca un incremento en la tasa de síntomas respiratorios (Jiménez, 2010; Tabla III).

Cuando las concentraciones de los contaminantes presentes en el aire rebasan los umbrales permisibles para el hombre, o cuando por una prolongada exposición a los mismos se presenta una intoxicación, los efectos identificados pueden ser los siguientes: alteración en los signos vitales (temperatura, presión, respiración), coloración y olor anormal de la piel, efectos en el ojo (excesiva contracción o dilatación, conjuntivitis), efectos gastrointestinales (dolor, vómito) y efectos en el sistema nervioso central como convulsión, parálisis o alucinación (Alloway y Ayres, 1993).

Tabla III. Síntomas respiratorios por la Contaminación del Aire en México (2010)

Síntomas respiratorios	Número de casos	Costo de atención (Miles de pesos)
Síntomas respiratorios no especificados	389 124	N.D.
Infecciones respiratorias agudas	104 400	24 500
Asma	24 000	28 158
Bronquitis crónica	2 750	14 962
Bronquitis aguda	1 726	2 025
Total	522 000	69 645

N.D. = No Disponible
 Fuente: Jiménez (2010).

II.5.1. Material Particulado (PM₁₀)

Debido a su tamaño, las partículas de diámetro menor o igual a 10 micrómetros (PM₁₀) su tamaño es comparable a la séptima parte del diámetro del cabello humano (Figura 1), por dicha característica son también llamadas partículas respirables, debido a su capacidad de introducirse por las vías respiratorias y su penetración en el organismo.

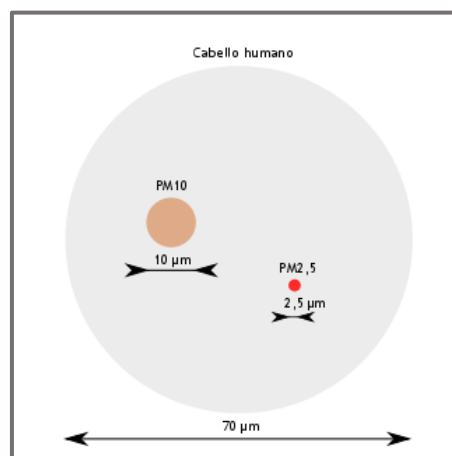


Figura 1. Comparativo del tamaño de las PM₁₀ y PM_{2.5} con el diámetro del cabello humano.

Se ha encontrado que los efectos de PM₁₀ que se generan a corto plazo en la salud humana son: un aumento de la morbilidad respiratoria, disminución en la función pulmonar, interferencia en mecanismos de defensa pulmonar, así como síntomas de padecimiento del síndrome bronquial obstructivo, mientras que a largo plazo sus efectos van desde un menor desarrollo y funcionamiento del sistema respiratorio, hasta mayores riesgos de padecer cáncer pulmonar en la edad adulta (Oyarzún, 2010).

II.5.2. Metales (Cu, Fe, Mn, Pb)

Cobre

El cobre es uno de los metales más estudiados debido a los efectos que tiene en la salud de los seres vivos, su toxicidad es atribuida principalmente al ion Cu (II) (Botello et al., 2005).

La exposición al polvo y al vapor de cobre puede irritar las vías respiratorias causando hemorragia nasal o la llamada “fiebre de vapor metálico”, que entre los efectos de larga duración que provoca es la irritación crónica de la nariz, alergias en la piel, color verdoso en piel, dientes y pelo, y afectación al hígado (Pérez y Hernández, 2006).

Hierro

La exposición al hierro puede provocar conjuntivitis, coriorretinitis, a su vez, la inhalación de concentraciones excesivas de óxido de hierro puede incrementar el riesgo de desarrollar cáncer de pulmón, esto se ha notado en trabajadores con una exposición prolongada a este metal (Pérez y Hernandez, 2006).

La inhalación crónica de concentraciones excesivas de vapores o polvos de óxido de hierro puede resultar en el desarrollo de una neumoconiosis benigna, llamada siderosis, que es observable con una toma de rayos X en los pulmones (Lenntech, 2018). La siderosis es una forma de neumoconiosis producida por la inhalación y depósito pulmonar de polvo o humos de hierro metálico y óxido de hierro, dicho trastorno está clasificado como una enfermedad ocupacional. Se desarrolla tras procesos de fusión del hierro que liberan partículas finas de óxido ferroso, el cual es rápidamente oxidado y se transforma en óxido férrico, cuya inhalación mantenida es causante de la enfermedad (INSHT, 2015).

Manganeso

La exposición a altos niveles de manganeso, por ejemplo en trabajadores de la industria, puede conllevar problemas en el sistema nervioso, los cuales se reflejan en la coordinación de los movimientos hasta síntomas más severos, este padecimiento es denominado manganismo (ATSDR, 2018)

Los efectos crónicos de la exposición al manganeso a nivel neurológico provocan somnolencia, letargia, dificultad para hablar, inexpresión facial, temblores y alteraciones mentales; y a nivel respiratorio tos, bronquitis, neumonías, etc. La inhalación continua de polvos de manganeso en humanos expuestos laboralmente puede producir desde irritaciones de los pulmones hasta neumonía, impotencia y pérdida de la libido sexual; sin embargo, no hay estudios que demuestren su potencial cancerígeno (Ferrís-Tortajada et al., 2001).

Plomo

Los riesgos relacionados con la exposición al plomo a través de la inhalación son el aumento de los niveles de este metal en la sangre (Valdivia, 2005), puesto que la respiración lo lleva directamente al torrente sanguíneo, donde tiene afectaciones directas en los tejidos blandos y huesos del organismo (Sanin et al.,

1998). Los primeros síntomas que provoca son irascibilidad, desgano y fatiga, que comúnmente son menospreciados o confundidos, con el tiempo se presenta dolor de cabeza, pérdida del apetito, dolor de estómago y vómito. Finalmente, los síntomas empeoran y el cerebro, riñones e hígado sufren daños irreparables. En la fase terminal del cuadro clínico existen convulsiones, coma y posteriormente la muerte (Jiménez, 2010) (Tabla IV).

Tabla IV. Efectos de la presencia de Plomo en la sangre humana.

Concentración de plomo en la sangre (Mg/dL).	Efectos en la salud.
80-100	Signos y síntomas de encefalopatía, neuropatía crónica, daños al corazón, infertilidad.
70	Anemia, disfunción testicular.
60	Neuropatías periféricas, complicaciones en el embarazo.
50	Esperma anormal.
40	Nacimiento prematuro, problemas cromosómicos.
30	Presión sanguínea alta.
10	Disminución en el crecimiento del feto.

Fuente: Jiménez, (2010).

II.6. Valores Máximos Permisibles de Calidad del Aire

Los valores límite permisibles de concentración para compuestos contaminantes en el aire ambiente se han establecido con la finalidad de garantizar que mientras estos se cumplan y las condiciones ambientales se encuentren por abajo de estos, no existirá peligro a la salud para la población por exposición al aire

ambiente. Estos límites se fijan en base a estudios toxicológicos y de exposición tanto en seres humanos como animales, para garantizar el buen estado de la calidad del aire, preservar el medio ambiente y los recursos de este. Sin embargo, en nuestro país no se cuenta con la normatividad adecuada para regir y controlar los límites de concentración de todos los contaminantes del presente estudio (únicamente se encuentra normado el metal plomo y el material particulado), ya sea por falta de recursos o la infraestructura adecuada para fundamentar el establecimiento de estándares de calidad del aire, por lo tanto se optó por la revisión de normas establecidas por la Organización Mundial de la Salud y por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (SEMARNAT, 2013).

II.6.1. Valores Máximos Permisibles para Material Particulado (PM₁₀)

La norma que rige los valores límite permisibles para material particulado (PM₁₀), así como sus métodos de evaluación en el aire ambiente, es la NOM-025-SSA1-2014. Dicha Norma señala que la unidad de concentración de los contaminantes en masa está dada en microgramos en un volumen de aire en metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), esto medido a las condiciones locales de temperatura y presión. La NOM-025-SSA1-2014 es de observancia obligatoria en todo el territorio nacional por las autoridades federales y locales que tengan a su cargo la vigilancia y evaluación de la calidad del aire, las cuales deberán tomar como referencia los valores e indicadores establecidos en esta norma.

Esta Norma Oficial Mexicana explica el manejo de datos, así como los cálculos necesarios para su cumplimiento, se especifica que un sitio cumple con el límite permisible a 24 horas cuando el promedio aritmético diario presenta una concentración menor o igual a $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el promedio anual, éste se calculará en base a un mínimo de datos válidos obtenidos en el promedio diario,

este mínimo se evalúa a partir de la cantidad de muestras de 24 horas válidas obtenidas en cada uno de los 4 trimestres del año (Tabla V), de tal manera que un sitio cumple con el límite anual cuando el promedio anual de los valores diarios es menor o igual a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (DOF, 2014)

Tabla V. Meses incluidos por trimestre

Trimestre	Meses
1	Enero, febrero, marzo
2	Abril, mayo, junio
3	Julio, agosto, septiembre
4	Octubre, noviembre, diciembre

II.6.2. Valores Máximos Permisibles para Metales Potencialmente Tóxicos (Cu, Fe, Mn, Pb)

Cobre: El Ministerio de Medio Ambiente y Cambio Climático de Ontario (OME) presenta un listado de algunos contaminantes ambientales especificando para el Cobre un valor máximo permisible de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un periodo de 24 horas (Ontario Ministry of Environment, 2012).

Hierro: El valor establecido por la OME como límite permisible para este metal es un promedio aritmético a 24 horas, el cual es de $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Manganeso: El Ministerio de Medio Ambiente y Cambio Climático de Ontario tiene especificación de valores límite permisibles para este metal y sus compuestos, la cual indica que no debe sobrepasar la concentración de $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un periodo de 24 horas, ésta regulación se encuentra publicada en el resumen

listado de contaminantes del aire del documento de Criterios de Calidad del Aire Ambiente de Ontario (Ontario Ministry of Enviroment, 2012).

Plomo: Este metal tiene valor límite normado por las autoridades mexicanas, donde en la Norma oficial NOM-026-SSA1-1993 se establece que la concentración de plomo, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el valor permisible de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un periodo de tres meses como promedio aritmético, para la protección a la salud de la población susceptible. Por su parte el Ministerio de Medio Ambiente y Cambio Climático de Ontario especifica un valor límite permisible de $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio aritmético en 24 horas (Ontario Ministry of Enviroment, 2012). A continuación, se presenta la Tabla VI que es un resumen de los límites permisibles para los contaminantes abordados en el presente trabajo, así como las instituciones que los regulan.

Tabla VI. Normas y criterios para estimar la calidad del aire ambiente.

Contaminante	Límite permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo promedio	Organismo regulador
PM ₁₀	75	Diario	NOM-025-SSA1-2014
	40	Anual	
Cobre	50	Diario	OME, 2012
Hierro	4	Diario	OME, 2012
Manganeso	0.2	Diario	OME, 2012
Plomo	1.5	Trimestral	NOM-026-SSA1-1993
	0.5	Diario	OME, 2012

II.7. Criterio de Días de Buena, Regular y Mala Calidad del Aire

La distribución de los días con calidad del aire buena, regular y mala para PM₁₀ en este estudio se obtuvo mediante lo establecido en el Informe Nacional de Calidad del Aire (Secretaría del Medio Ambiente, 2017), de tal manera que se clasifican los resultados de concentración de PM₁₀ en base a una escala indicando así si se considera Buena, Regular o Mala la Calidad del aire en dicho día.

- Días con calidad del aire buena: cuando el dato diario obtenido se ubica en el intervalo definido entre cero y la mitad del límite respectivo especificado en las NOM-025-SSA1-2014 el cual sería menor a 37.5 µg/m³.
- Días con calidad del aire regular: cuando el dato diario obtenido se ubica en el intervalo definido entre la mitad del límite respectivo especificado en la NOM-025-SSA1-2014 y el límite mismo (37.5, 75 µg/m³).
- Días con mala calidad del aire: cuando el dato diario obtenido rebasa el límite especificado en la NOM-025-SSA1-2014 (>75 µg/m³).

A continuación, en la Tabla VII se presenta un resumen del criterio de calidad de días de Buena, Regular y Mala Calidad del Aire.

Tabla VII. Color, calificativo e intervalo de concentración para PM₁₀

Color	Calificativo	Rango de concentración
Verde	Buena	(0,37.5]
Amarillo	Regular	(37.5,75]
Rojo	Mala	>75

El objetivo de este indicador es mostrar el porcentaje de días con mala calidad del aire, en base al totas de muestras validas obtenidas en la estación de monitoreo.

II.8. Estudios Realizados de Calidad del Aire en Algunos Estados de México

Actualmente, las normas de calidad del aire se rebasan en varias ciudades del país. Esto ocurre aun cuando dichas normas no han sido fijadas por abajo de los estándares recomendados por la Organización Mundial de la Salud (Greenpeace, 2018). Según datos del informe “El Aire que Respiro: El Estado de la Calidad del Aire” de Greenpeace de 2018, en el año 2014, el límite establecido por la NOM-025-SSA1-2014 para material particulado menor o igual a 10 micras (PM_{10}) se excedió en algunas ciudades de la República Mexicana, como Ciudad Juárez, Monterrey, la Zona Metropolitana de Guadalajara, Toluca, Celaya, Torreón, Ciudad Victoria y otras ciudades del país (Figura 2).



Figura 2. El estado de la calidad del aire en México.

A continuación, se presentan algunos estudios como parte de la revisión de la literatura correspondiente a PM_{10} y metales en estados de la República Mexicana.

Análisis Temporal del Comportamiento de PM_{10} , en el Área Metropolitana de Monterrey, México.

La ciudad de Monterrey, Nuevo León, es la tercera metrópoli más grande de México, por lo tanto, es importante realizar estudios sobre la calidad del aire en ella. En el presente estudio se analizó el comportamiento temporal de las partículas PM_{10} desde 2006 hasta 2008. Se compararon los datos reportados por el Sistema Integral de Monitoreo Ambiental, anual, diaria y semanalmente entre sí. Se concluyó que la temporada invernal fue la más contaminada durante el tiempo de estudio, los días más contaminados fueron jueves y viernes; las horas de mayor contaminación fueron de 8:00 a 10:00 am, mientras que las noches, se considera, fueron las de horas más limpias durante el ciclo de 24 horas.

Los resultados reportados en este trabajo indican claramente que es necesario establecer medidas de acción para reducir los contaminantes en la ciudad de Monterrey (González et al., 2011).

Análisis de Partículas Suspendidas Totales (PST) y Partículas de Fracción Respirable (PM_{10}), en Cunduacán, Tabasco.

En la atmósfera del municipio de Cunduacán, Tabasco, se analizó la concentración de partículas suspendidas totales (PST) y partículas fracción respirable (PM_{10}). Se realizó el muestreo en filtros de fibra de vidrio mediante el uso de monitores de Alto Volumen, durante febrero de 2001 a octubre de 2003

obteniendo 58 muestras de PM₁₀. En el año 2001 (196.83 µg/m³), 2002 (169.20 µg/m³) y 2003 (224.97 µg/m³) excedieron el límite anual establecido en las normas de calidad del aire (NOM-035-ECOL/1993 y NOM-CCAM-002 ECOL/1993) para la protección de la salud de 150 µg/m³ PM₁₀. En este estudio la principal fuente de emisión que coincide con los meses que registraron altas concentraciones de partículas monitoreadas en Cunduacán, son los incendios agropecuarios (Pérez-Vidal et al., 2010).

Concentración Másica, Composición y Origen del Material particulado Fino y Grueso en la Ciudad de Tijuana, México, durante el Proyecto Cal-Mex.

Este proyecto fue realizado como parte del programa Cal-Mex, enfocado a la investigación de la calidad del aire ambiente a lo largo de la frontera entre México y California. El muestreo fue realizado en dos sitios dentro de la urbe tijuanaense, a partir del 17 de mayo hasta el 27 de julio de 2010.

Se realizaron análisis gravimétricos y químicos para material particulado PM₁₀, PM_{2.5} y algunos metales. Se concluyó que, en general, las concentraciones tanto para PM₁₀, PM_{2.5} y metales, fueron menores que las reportadas para la ciudad de México en 2006 durante el proyecto MILAGRO, con excepción del Plomo. Se atribuye que la concentración de plomo sea alta en esta zona debido a la actividad industrial de la ciudad de Tijuana (Minguillón et al., 2014).

II.9. Área de Estudio

II.9.1. Localización del Área de Estudio

El estudio se realizó en la estación de monitoreo Cerro de Antenas, ubicada en la región de Cananea, Sonora, México, municipio localizado en las coordenadas 30°58' latitud norte y 110°17' longitud oeste del Estado de Sonora, colindante con los municipios de Fronteras, Imuris, Santa Cruz, Bacoachi, Arizpe y Naco, siendo frontera al norte con los Estados Unidos de América. El monitor Cerro de Antenas se encuentra en el interior del complejo minero, en las coordenadas UTM 565331 con 3424762, con especificación de captación de PM₁₀. Esta ubicación se encuentra en la parte alta del cerro del mismo nombre (Figura 3).

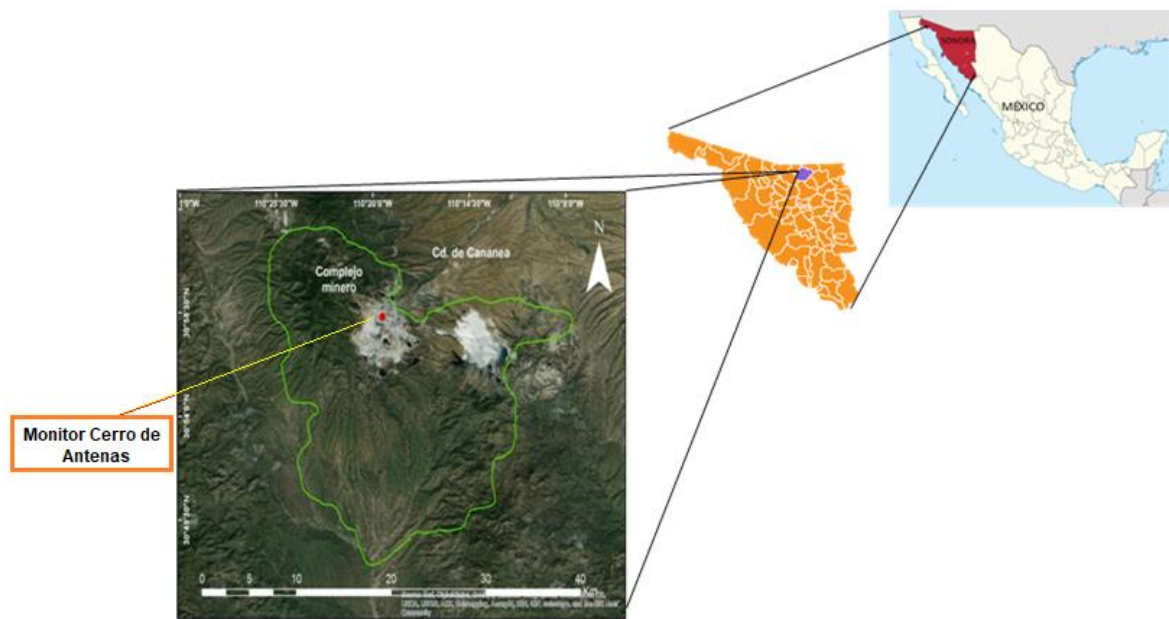


Figura 3. Área de estudio y ubicación del monitor Cerro de Antenas.

II.9.2. Cananea, Sonora, México

El municipio de Cananea cuenta con una extensión territorial de 4,142 km², siendo esto el 2.31% del total de la extensión territorial del Estado de Sonora, su cabecera municipal la Ciudad con el mismo nombre, oficialmente Heroica Ciudad de Cananea, el cual es considerado como el centro minero del país.

Climatología

En Cananea, los veranos son muy calientes, los inviernos son fríos y secos, se presenta un estado del tiempo parcialmente nublado durante la mayor parte del año. El tipo de clima que presenta el municipio es templado subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad, semiseco templado y seco templado (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 1997).

Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 1 a 32 °C y rara vez baja a menos de -5 °C o sube a más de 36 °C. A diferencia de la mayoría del estado, el municipio de Cananea tiene una temperatura media anual de 15 °C (SMN, 2016).

El periodo de lluvias se presenta en verano, en los meses de julio a septiembre, contándose con una precipitación media anual de 545 milímetros. En los meses de febrero, marzo y abril es común la presencia de lluvias, aguanieve y nevadas, las cuales llevan a provocar el cierre de carreteras que conectan el municipio (INAFED, 2004).

Flora y Fauna

La flora de la región está compuesta de manera predominante por pastizales, con un 57.84% de la superficie municipal, seguida de Bosques (38.08%) ubicados en las serranías colindantes con los municipios de Imuris y Santa Cruz teniendo especies como Pino (*Pinus cembroides*, *Pinus ssp*), Encino (*Quercus emoryi*) y

Tascate (*Juniperus monosperma*). Únicamente el 0.8% de la extensión territorial de Cananea es utilizada para agricultura, con la producción de Manzana (*Malus sylvestris*), Membrillo (*Cydonia oblonga*) y Ciruela (*Prunus domestica*). El 1.39% de la superficie es de Matorrales y restando un 1.89 de otro tipo de vegetación (INEGI, 1997). En lo referente a la fauna del municipio, debido a la geografía de la región, se encuentran mayormente especies como: sapo, salamandra, rana verde, tortuga de agua, camaleón, cachora, víbora sorda, víbora de cascabel, venado cola blanca, puma, lince, coyote, jaguar, jabalí, liebre, conejo, ardilla, entre otros (INAFED, 2004).

Características y Uso de Suelo

La mayoría de las fuentes de contaminación tanto naturales como antropogénicas son encontradas en regiones áridas y semiáridas, que representan aproximadamente el 40 % de la superficie global y son habitadas por un tercio de la población líder mundial (UNDP, 1997). Según datos del INEGI, el 73.94% de la superficie municipal de Cananea no es apta para actividades agrícolas puesto que la mayor parte de su territorio consta de flora y fauna típica de los pastizales y matorrales, siendo entonces, la minería, una de sus principales actividades de uso de suelo.

Población

El Sistema de Información y Estadística del Estado de Sonora (SIEES) reporta en su portal, que al año 2018 el municipio de Cananea contaba con una población de 35,765 habitantes. La información estadística del SIEES reporta a Cananea como un municipio donde su población es mayormente joven, ya que del total de la población, el 39.4% está constituido por adultos de entre 30 a 64 años, seguido por el grupo poblacional conformado por niños de 0-14 años, con el 28.6% de la población (COESPO, 2015).

Fuentes de Contaminación

Debido a que el municipio de Cananea se encuentra ubicado geográficamente en una región donde predominan los pastizales, dicho ecosistema se caracteriza por presentar clima templado entre semiárido y húmedo. Según la UNDP, la mayoría de las fuentes de contaminación tanto naturales como antropogénicas son encontradas en regiones con ecosistemas áridos o semi áridos (UNDP, 1997). Además del ecosistema que predomina en la región, otra fuente contaminación importante en Cananea es la industria minera, la cual es una actividad generadora de contaminantes y es de las principales actividades del municipio.

III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

III.1. Frecuencia y Procedimiento de Colecta de Muestras de Aire

La recolección de las muestras se realizó, como lo indica la Norma NOM-035-ECOL-1993 (DOF, 1993), donde se especifica como método de muestreo el equipo de Alto Volumen (Hi-Vol) el cual debe contar con ciertos accesorios, tales como: un medidor de flujo de viento, un termómetro, un barómetro, un medidor de tiempo (Timer), así como mantener un adecuado control de la posición del filtro en el monitor (Figura 4). El monitor de Alto Volumen se encuentra en el interior del complejo minero, en las coordenadas UTM 565331 con 3424762.

La frecuencia de recolección de muestras se encuentra establecida en el programa REIIICA (Red Estatal de Infraestructura e Información sobre Calidad del Aire) el cual es operado por el Centro de Ecología y Desarrollo del Estado de Sonora, donde establece un muestreo de 24 horas, con colocación de filtros cada 6 días, teniendo anualmente de 60-61 muestras, con el objetivo de analizar y evaluar la calidad del aire. En el caso de este estudio se obtuvieron 60 muestras para el periodo anual 2017 completo.

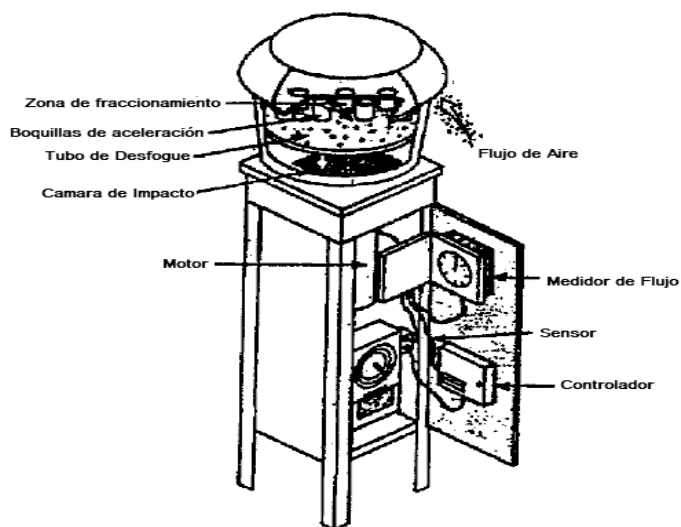


Figura 4. Muestreador de Alto Volumen (Hi-Vol).

III.2. Operación de las Estaciones de Monitoreo

El municipio de Cananea cuenta con alta actividad de tipo industrial y minera, por lo que es una zona con condiciones de interés para la colocación de muestreadores de la calidad del aire ambiente, esto según lo establecido por la Norma NOM-156-SEMARNAT-2012 (DOF, 2012). La operación de las estaciones de monitoreo deben cumplir con ciertas características, desde su colocación, hasta su funcionamiento, tales como su colocación a una altura adecuada (para zonas urbanas de 2 a 15 metros sobre el suelo), además deben ser consideradas características de la zona a colocarse como una distancia mínima de 20 m de los árboles, no contar con presencia de edificios o cerros cercanos y no cerca de hornos, chimeneas o puntos de incineración de materiales orgánicos e inorgánicos (EPA, 1999).

III.2.1. Preparación de los Filtros (acondicionamiento) para la Colecta de las Muestras de Aire

La colocación de los filtros muestreadores (fibra de vidrio), es una actividad que fue realizada por personal capacitado, el cual para desempeñar esta labor utilizó en todo momento guantes de hule y cubre bocas, con la finalidad de hacer menos posible el contaminar las muestras.

A continuación, se explican brevemente los pasos necesarios para realizar dicha actividad.

1. Se enumeran los filtros en las esquinas, esto para evitar que la tinta contamine las muestras al ser analizadas.
2. Se inicia el proceso de secado, donde se pesa de manera inicial y se continúa tomando nota de los pesos de cada filtro, mientras se mantiene

secando en un equipo desecador, con sílica gel activa. Este paso continúa hasta obtener un peso constante el cual es denominado el peso inicial.

3. Se procede a la colocación de los filtros en el porta filtros, para ser llevados a la estación de monitoreo y colocarse dentro del monitor.
4. El equipo muestreador debe ser limpiado detalladamente, en especial el cabezal muestreador y así proceder a colocar el filtro de fibra de vidrio.
5. Ya colocados el porta filtro con el filtro dentro del muestreador, se continúa con la colocación de la gráfica para la variación de flujo dentro del registrador de flujo de vientos.
6. Se enciende y se programa el Timer para la operación del muestreador por 24 horas.
7. Transcurridas las 24 horas se procede a retirar el filtro y la gráfica de variación de flujos; asimismo, se toma nota de las horas de funcionamiento del equipo para evitar descartar la muestra por invalidez.

III.2.2. Determinaciones Analíticas: Material Particulado PM₁₀, Metales (Cu, Fe, Mn, Pb)

PM₁₀

La determinación de las concentraciones de material particulado colectado en los filtros se realiza mediante el cálculo de la ganancia de masa neta. Por diferencia de pesos, del peso inicial obtenido después del secado del filtro bajo condiciones controladas y el peso final obtenido pasadas las 24 horas de su colocación y puesta en marcha en el monitor, se expresa la diferencia de masa neta colectada

en el filtro en unidades de microgramos (μg). Asimismo, el volumen de aire muestreado se obtiene a partir del medidor de flujo de aire en el muestreador Hi-Vol, el cual es calculado como promedio de las 24 horas de muestreo y se expresa en metros cúbicos (m^3). De tal forma que la concentración de PM_{10} muestreada en el filtro se expresa en unidades de microgramo sobre metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Metales (Cu, Fe, Mn, Pb)

El procesamiento de los filtros de fibra de vidrio, para la obtención de las concentraciones de metales, fue realizado mediante extracción ácida (digestión) en los laboratorios del Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora (DICTUS) y el Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia (DIQYM). El procedimiento de laboratorio consistió de los siguientes pasos, los cuales se basaron en el Código de Regulación Ambiental de la US EPA (EPA, 1992):

1. Corte del filtro, con la ayuda de plantillas previamente lavadas en una disolución de ácido nítrico al 20%; para evitar contaminación externa, las cuales fueron diseñadas para proporcionar las dimensiones requeridas para la digestión ácida (3/4" x 8") y de cortadores.
2. La tira de filtro cortada es doblada dos veces por la mitad y colocada dentro de un vaso de precipitado de vidrio adecuado para ser calentado, y este es tapado con un vidrio de reloj.
3. Se añaden 15 mL de HNO_3 3M, tratando de añadirlo de tal forma que cubra la superficie del filtro.

4. Se comienza a calentar lentamente el filtro en el vaso de precipitado de forma suave, para evitar que por salpicaduras se pierda solución. El calentamiento dura alrededor de 30 minutos, teniendo cuidado que la muestra no se seque ni se evapore completamente.
5. El filtro es retirado del calentamiento y se deja enfriar a temperatura ambiente.
6. Se realiza el enjuague del filtro, el cual consiste en lavar las paredes y la superficie del filtro con agua deionizada y este líquido de enjuague es transferido a un matraz volumétrico de 100 mL.
7. Se repite el paso anterior, dejando reposar el líquido de enjuague primero por 1 hora, finalmente media hora, teniendo cuidado de no rebasar la marca del aforo del matraz. Este paso es muy importante pues el reposo le permite al filtro desprender el metal de la extracción ácida y solubilizarlo para su posterior análisis.
8. Después de los enjuagues del líquido del filtro, se procede al aforo del matraz volumétrico y se deja reposar para su posterior decantación en envases de plástico previamente identificados y lavados con ácido.
9. Se realiza el análisis de las muestras mediante espectroscopía de absorción atómica por flama, utilizando un equipo de absorción atómica PERKIN-ELMER, Modelo AAnalyst 400.

La concentración de cada metal se calculará a través de la siguiente ecuación:

$$C = \frac{(Lectura\ EAA * Vol.\ total * Número\ de\ tiras\ por\ filtro) - F_b}{v_{STP}} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$$C = \text{Concentración total del metal} [=] \frac{\mu g}{m^3}$$

$$Lectura\ EAA = \text{Lectura registrada por el Equipo de Absorción Atómica} [=] \frac{\mu g}{mL}$$

$$Vol.\ total = \text{Volumen total de la muestra} [=] \frac{100mL}{tira}$$

$$Número\ de\ tiras\ por\ filtro [=] \frac{12\ tiras}{Filtro}$$

$$F_b = \text{Concentración de filtro blanco} [=] \frac{\mu g}{Filtro}$$

$$F_b = \frac{\mu g}{mL} * \frac{100mL}{tira} * \frac{12\ tiras}{Filtro} \quad \text{Ec. 2}$$

$$v_{STP} = \text{Volumen total de aire filtrado} [=] \frac{m^3}{Filtro}$$

III.3. Control de Calidad en el Muestreo y Análisis de las Muestras de Filtros

III.3.1. Criterio de Cobertura de Datos

Para la validación de los resultados monitoreados, la Normatividad Mexicana exige que se cumpla con un criterio de cobertura mínima de al menos 75% de muestras válidas por trimestre y tener como mínimo 3 trimestres cumpliendo dicho criterio para considerar los resultados anuales como válidos. Los resultados de la evaluación en base a este criterio para el ciclo anual 2017 del monitor Cerro de Antenas se presentan a continuación en la Tabla VIII, determinándose como válido el muestreo de este año en cuanto al Criterio de Cobertura.

Tabla VIII. Evaluación del Criterio de Cobertura de datos para muestreo de PM₁₀, realizado en el Monitor Cerro de Antenas durante el ciclo anual 2017.

Trimestre	Muestras programadas	75 % de las muestras	Muestras	Cumple
Enero a marzo	15	11	15	Si
Abril a junio	15	11	15	Si
Julio a septiembre	15	11	15	Si
Octubre a diciembre	15	11	15	Si

III.3.2. Preparación y Limpieza del Material de Cristalería

La cristalería e instrumentos necesarios para su manejo y análisis fueron tratados con un procedimiento de rigurosa limpieza, consistente en un lavado con detergente, enjuague con agua corriente y sumergido en una disolución de ácido nítrico al 20% (v/v), dejándose durante 72 horas. Posteriormente, se realizó el enjuague con agua deionizada, comprobando que se encuentra libre de ácido mediante la medición del pH, se secaron y finalmente se almacenaron en bolsas de plástico, para evitar contaminaciones externas esto en base a la metodología recomendada por el Manual de Aseguramiento de Calidad para Sistemas de Medición de Contaminación del Aire (EPA (1998) y Norma Mexicana (NMX-AA-115-SCFI-2001).

III.3.3. Almacenamiento y Transporte de las Muestras (Filtros)

Los filtros fueron almacenados para su envío a la ciudad de Hermosillo, Sonora, para esto cada filtro fue colocado en un sobre etiquetado con su numeral de serie correspondiente, fecha y monitor de muestreo, asimismo con su gráfica de variación de flujo de viento, y cerrado.

Al término de cada dos trimestres (enero a junio y julio a diciembre) fueron recogidos en Cananea y llevados a la Universidad de Sonora, al Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (DICTUS) en donde se realizó el trabajo de laboratorio y en el Departamento de Ingeniería Química, se realizaron los análisis de cuantificación de metales.

III.4. Indicadores de Calidad de los Datos

El trabajo de laboratorio y análisis de muestras se realizó en dos fases, inicialmente los dos primeros trimestres del ciclo (enero-junio), y finalmente los últimos dos trimestres (julio-diciembre). A continuación, se presentan algunas actividades que se tomaron como indicadores de calidad y que fueron realizados durante este trabajo con la finalidad de presentar resultados de alta confiabilidad.

III.4.1. Blancos de Campo, Laboratorio y Equipo

El llevar a cabo el control de calidad a través del análisis de blancos de campo es un punto muy importante para considerar válido un muestreo, ya que los blancos de campo permiten evaluar y posteriormente disminuir los posibles riesgos de contaminación ya sea por efectos de los procedimientos o de las actividades de traslado de las muestras.

En el caso particular de este trabajo, se analizaron blancos de campo de filtros sin usar, los cuales fueron almacenados y transportados de la misma manera que los filtros usados en los monitores. Asimismo, a los blancos de campo se les realizó la extracción ácida con el mismo protocolo que a los demás filtros y finalmente fueron analizados por metales (Cu, Fe, Mn y Pb) a través de espectroscopía de absorción atómica.

En el Anexo A: Tabla A - 1 y la Tabla A – 2 se presentan los resultados de los blancos de campo para el primer y segundo semestre del año respectivamente. Esta información permite descartar la concentración que pudiera tenerse como aporte del material inicial del filtro, de los ácidos de la digestión o de cualquier otro punto donde pudiera haber tenido contacto el filtro (muestra de aire) con algún contaminante externo.

Por otra parte, se llevó a cabo la calibración del equipo de análisis de espectroscopía por absorción atómica siguiendo las instrucciones del fabricante; asimismo, se realizaron las curvas de calibración para cada metal, preparándose estándares a partir de soluciones grado analítico marca Baker, preparándose un mínimo de 4 estándares de diferente concentración para cada metal.

Para estimar si los puntos experimentales se ajustan bien a una línea recta, se calculó el Coeficiente de Correlación. Los resultados obtenidos fluctuaron en un intervalo de: $r = 0.9984$ a 0.9999 en el periodo enero-junio 2017 y $r = 0.9998$ a 0.9999 en el periodo julio-diciembre 2017, lo cual indica que la asociación entre las variables (absorbancia y concentración) es aceptable, por lo que se cumple con lo recomendado ($r > 0.99$) establecido en la Norma Oficial Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2001 (DOF, 2001). Por lo tanto, las curvas de calibración para cada metal analizado son confiables (Anexo A: Tabla A-3 y Tabla A-4).

III.4.2. Precisión

La precisión se define como la capacidad de un instrumento o una prueba de proporcionar el mismo resultado o una gran medida de concordancia durante el análisis múltiple (Mongay-Fernández, 2011). En el caso de este trabajo, la precisión se evaluó mediante el duplicado de muestras (filtros), las cuales fueron

elegidas al azar y recibieron el mismo proceso de corte, digestión y análisis de las demás muestras.

La precisión fue calculada como la diferencia porcentual relativa (DPR), debido a que se tiene únicamente una muestra por duplicado, utilizando la ecuación:

$$\text{Precisión} = \frac{a - b}{\frac{(a + b)}{2}} * 100 \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

a = Valor mayor del análisis de los dos duplicados

b = Valor menor del análisis de los dos duplicados

En el Anexo A: Tabla A-5 y Tabla A-6 se presenta la información del análisis de las muestras duplicadas. Se puede apreciar que el 100 % de los valores de precisión obtenidos expresado como Desviación Porcentual Relativa (% DPR) en muestras duplicadas (filtros), se encuentran dentro del 35%. Esto indica que el procedimiento de digestión de las muestras duplicadas (filtros) y la cuantificación de los metales por la técnica de Espectroscopía de Absorción Atómica es confiable y precisa.

III.4.3. Exactitud

La exactitud se define como la capacidad de un instrumento o una prueba de acercarse al valor verdadero o establecido (Mongay-Fernández, 2011). En este trabajo, se evaluó este parámetro a través del análisis cuantitativo de muestras fortificadas a tres concentraciones conocidas (0.50, 1.00 y 2.00 mg/L) con estándares de alta pureza marca Baker, dichas muestras se analizaron en el equipo de Absorción Atómica marca PERKIN-ELMER, Modelo AAnalyst 400.

Mediante la siguiente ecuación se midió el porcentaje de recuperación del análisis de las muestras fortificadas:

$$\% \text{ Recuperación} = \frac{a}{b} * 100$$

Ec. 4

Donde:

a = Concentración teórica adicionada a la muestra

b = Concentración medida en la muestra

Se estableció un límite de aceptación de la recuperación dentro del intervalo de 85 a 115% para metales como lo recomienda la Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2001 (DOF, 2001).

En el Anexo A: Tabla A-7 y Tabla A-8 se presentan los resultados correspondientes al análisis de las muestras fortificadas. De manera general, se puede apreciar que los porcentajes de recuperación fluctúan del 91.63% al 106.3%. Para el cobre, los resultados van desde un porcentaje de recuperación del 98.47% hasta 109.66%, el hierro fluctúa de 100.07% al 104.8%, el manganeso presenta recuperaciones porcentuales de 94% hasta 100.38 y el plomo de 91.63% hasta 100.44%. Con esto se puede concluir que la prueba de exactitud realizada es satisfactoria y, por lo tanto, los resultados obtenidos se consideran aceptables, ya que indica que el procedimiento de digestión de las muestras (filtros) y el rendimiento del equipo de absorción atómica fueron las correctas.

III.4.4. Detección del Instrumento (L.D.)

El límite de Detección (L.D.) se puede describir como la concentración que proporciona una señal en el instrumento diferente de la señal de una muestra en “blanco” o “señal de fondo”. En el presente trabajo se utilizó el criterio del límite de detección, como la cantidad de concentración de analito que proporciona una señal igual a la señal del blanco (YB), más tres veces la desviación estándar del blanco (SB) (DOF, 2001; Miller y Miller, 1993)

III.5. Normas de Calidad y/o Criterios de Calidad del Aire, Utilizados en la Presente Investigación

El presente estudio se realizó basándose inicialmente en el método de muestreo establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-035-ECOL-1993 (DOF, 1993) , el cual coincide con lo establecido por el Apéndice B, del título 40 del Código de Regulaciones Federales de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 1992). La comparación y análisis de los resultados de material particulado PM₁₀ en base a un límite permisible normado, se realizó en base a lo establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014 la cual presenta tanto un límite a 24 horas y un límite anual. Para el control de calidad se consideraron los lineamientos establecidos en el Manual de Aseguramiento de Calidad para Sistemas de Medición de Contaminación del Aire recomendada por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 1998)

Para el análisis y la comparación de los resultados obtenidos para los metales Cu, Fe, Mn y Pb, se realizó en base a los límites máximos permisibles establecidos por el Ministerio de Medio Ambiente de Ontario (Ontario Ministry of Environment, 2012), mientras que en el caso del Pb se realizó la comparación en base al límite establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-1993 (DOF, 1994) ya que es el único metal de este estudio que cuenta con un límite establecido en la Norma Oficial Mexicana.

Finalmente se realizó el análisis temporal de los resultados en base a la información meteorológica (temperatura, presión, humedad y velocidad del viento) reportada en la estación Cerro de Antenas y a través de la interpretación de la rosa de los vientos; gráfica la cual nos proporcionó información sobre la predominancia de la dirección de procedencia de los vientos durante cada trimestre del año en estudio, con dicha información se pudo deducir el motivo del comportamiento reportado en las concentraciones tanto de metales como de PM₁₀.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV.1. Material Particulado PM₁₀

El muestreo se realizó en la estación de monitoreo Cerro de Antenas; ubicada dentro del complejo minero, teniendo un total de 60 muestras válidas durante el periodo anual (2017), 15 por cada trimestre del año. Se presentan los datos obtenidos en el análisis de los filtros muestreados, los cuales se compararon con la NOM-025-SSA1-2014, en donde se especifica un límite permisible diario para PM₁₀ de 75 µg/m³, y un límite promedio anual de 40 µg/m³. Asimismo, como lo indica la Norma citada anteriormente, el análisis de resultados se llevó a cabo en periodos trimestrales durante un ciclo anual (2017) donde, por motivos prácticos se nombraran los trimestres de la siguiente manera: trimestre 1: enero, febrero y marzo; trimestre 2: abril, mayo y junio; trimestre 3: julio, agosto y septiembre y trimestre 4: octubre noviembre y diciembre.

IV.1.1. Comportamiento Trimestral para las Concentraciones de PM₁₀

Del total de las 60 muestras obtenidas en el monitor Cerro de Antenas durante 2017, poco más del 23% presentó resultados por encima del límite permisible diario de 75 µg/m³. En general el segundo trimestre (abril, mayo, junio) fue el de los más altos niveles de concentración, ya que 60% de las muestras arrojaron concentraciones por encima del límite establecido por la NOM-025-SSA1-2014, donde justo en este trimestre se presenta la máxima concentración del ciclo anual siendo esta de 150 µg/m³; en cambio el cuarto trimestre (octubre, noviembre, diciembre) presentó las más bajas concentraciones del ciclo estudiado, teniendo máximos de 41 µg/m³, concentración muy por debajo del límite diario normado (Tabla IX).

Tabla IX. Máximos, mínimos y número de veces fuera del límite permisible diario por trimestre para el monitor Cerro de Antenas.

Cerro de Antenas PM ₁₀ (2017)					
Trimestre	1	2	3	4	Total anual
Máximo	119	150	82	41	150
Mínimo	17	37	11	8	8
Veces fuera del límite	3	9	2	0	14
% Conteos fuera del límite	20	60	13.33	0	23.33

Trimestre 1 (enero, febrero, marzo)

Durante el primer trimestre del ciclo anual, en 3 ocasiones se presentaron resultados por encima del límite permisible, una en el mes de enero y dos durante el mes de marzo, donde el 80% de los resultados están dentro de Norma con valores que fluctuaron de 17 a 73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 5, Anexo B: Tabla B-1).

Se puede observar que la concentración máxima (119 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), coincide con la fecha en la cual la velocidad de los vientos es la más alta registrada en el trimestre (31/03/2017), siendo esta de 24 m/s proveniente del SW (Figura 6, Anexo C: Tabla C-1), dato de interés ya que en dicha dirección se encuentra el depósito de jales, por lo tanto, las altas velocidades y la dirección del viento pueden considerarse los motivos por los que la concentración en esta fecha es tan alta.

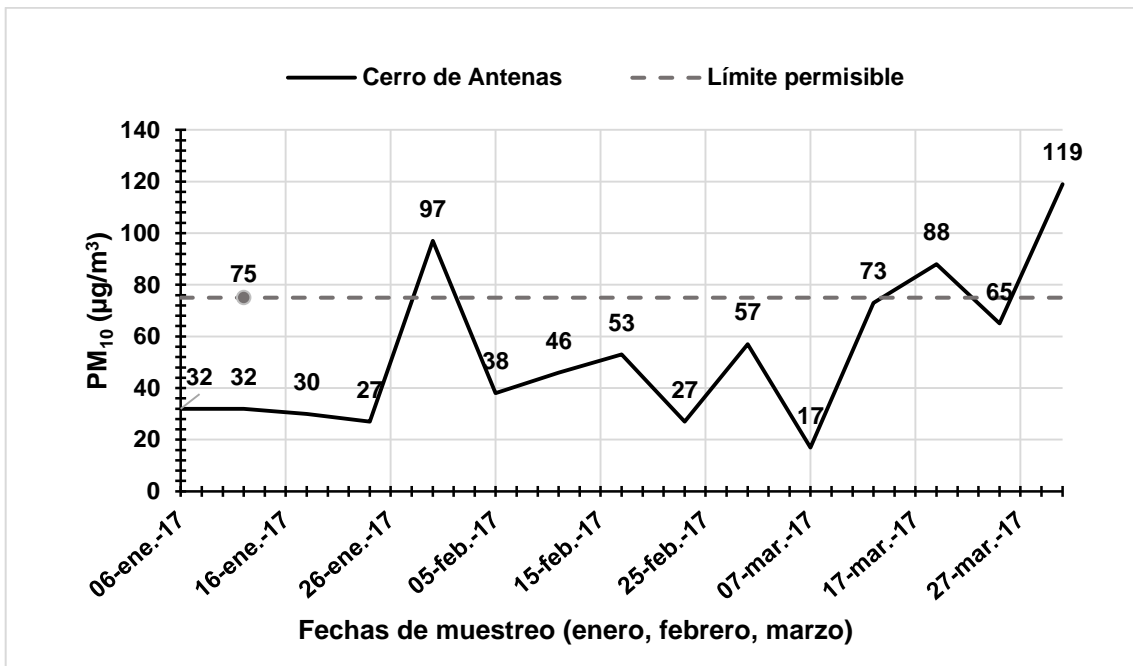


Figura 5. Comportamiento de la concentración de PM₁₀ durante el Trimestre 1 (enero a marzo de 2017) en el monitor Cerro de Antenas.

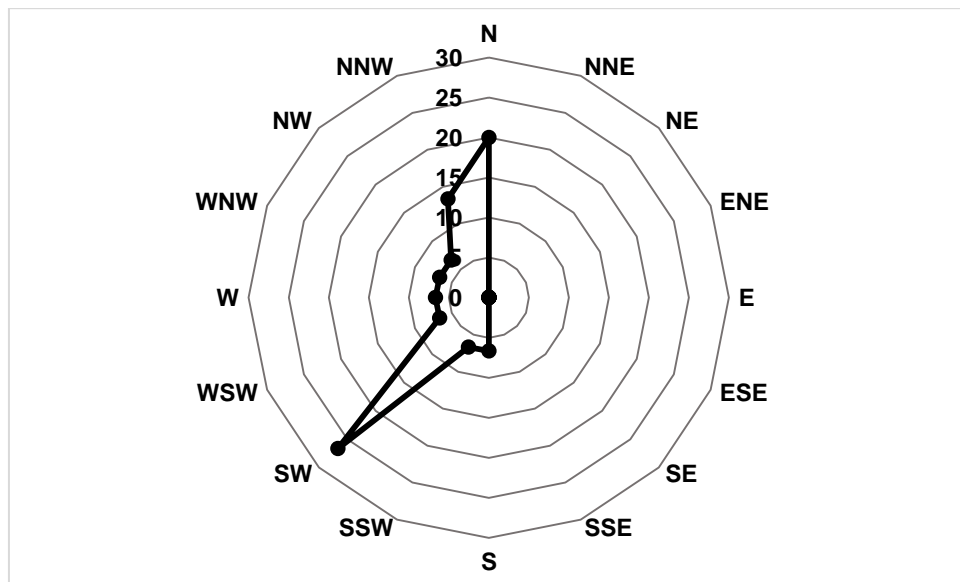


Figura 6. Direcciones de procedencia de los vientos durante el Trimestre 1 (enero, febrero, marzo).

Trimestre 2 (abril, mayo, junio)

En el segundo trimestre se presenta el mayor número de ocasiones en las que se sobrepasa el límite diario establecido por la Norma ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$), donde de 15 muestras válidas, 9 están por encima de este, 4 en el mes de abril, 3 en junio y 2 en mayo, con resultados que van desde 81 hasta $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 7, Anexo B: Tabla B-1). Las concentraciones más elevadas son 150, 122 y $145 \mu\text{g}/\text{m}^3$, las primeras dos se presentaron en el mes de junio y la tercera durante el mes de mayo; es importante mencionar que las concentraciones del mes de junio (150 y $122 \mu\text{g}/\text{m}^3$), son provenientes del NNE (Figura 8), con bajas rachas de viento (8-9 m/s) y temperaturas de 27 y 28°C . En general, las temperaturas durante este trimestre son las más altas del año, teniendo máximos de hasta 29° (Anexo C: Tabla C-2) y esto, sumado a las bajas velocidades del viento reportadas; sobre todo en los días de máximas concentraciones, pudo generar una resuspensión del material particulado, propio de las actividades mineras, lo que causó que en múltiples ocasiones se sobrepasara el límite permisible.

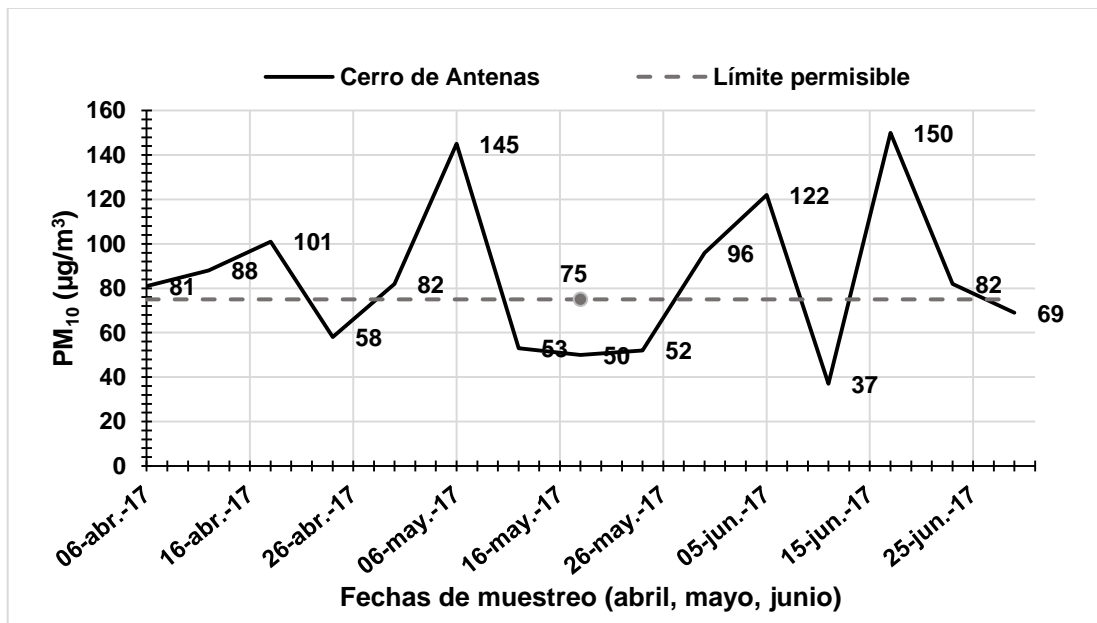


Figura 7. Comportamiento de la concentración de PM₁₀ durante el Trimestre 2 (abril a junio de 2017) en el monitor Cerro de Antenas.

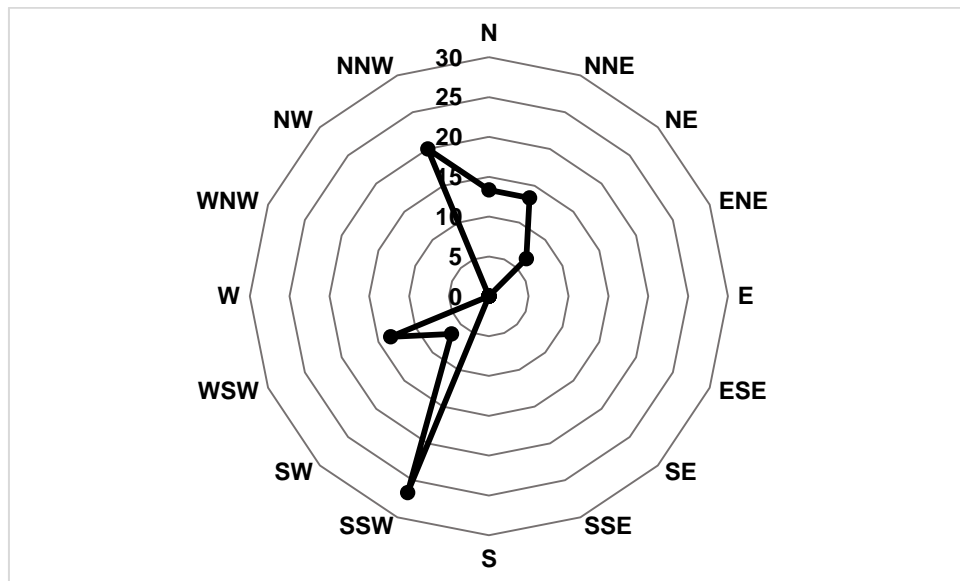


Figura 8. Direcciones de procedencia de los vientos durante el Trimestre 2 (abril, mayo, junio).

Trimestre 3 (abril, mayo, junio)

Durante la segunda mitad del ciclo anual, las concentraciones de PM_{10} son mucho más favorables que las obtenidas durante el primer semestre. Los resultados del tercer trimestre (julio, agosto, septiembre) arrojaron únicamente 2 datos por encima del límite permisible (75 y $82 \mu g/m^3$), estos resultados se generaron durante el mes de agosto. En general, las concentraciones reportadas para el trimestre 3 fluctuaron de 11 a $74 \mu g/m^3$ (Figura 9), con excepción de las dos ocasiones en las que se sobrepasa el límite normado (Anexo B: Tabla B-2).

Se observó que el 60% de los vientos durante este trimestre son procedentes de SSW-SW-WSW (Figura 10) y a diferencia de los primeros dos trimestres, se presentaron precipitaciones de hasta 14 mm; esto último puede ser uno de los motivos por los que las concentraciones disminuyeron en comparación con el primer semestre anual (Anexo C: Tabla C-3).

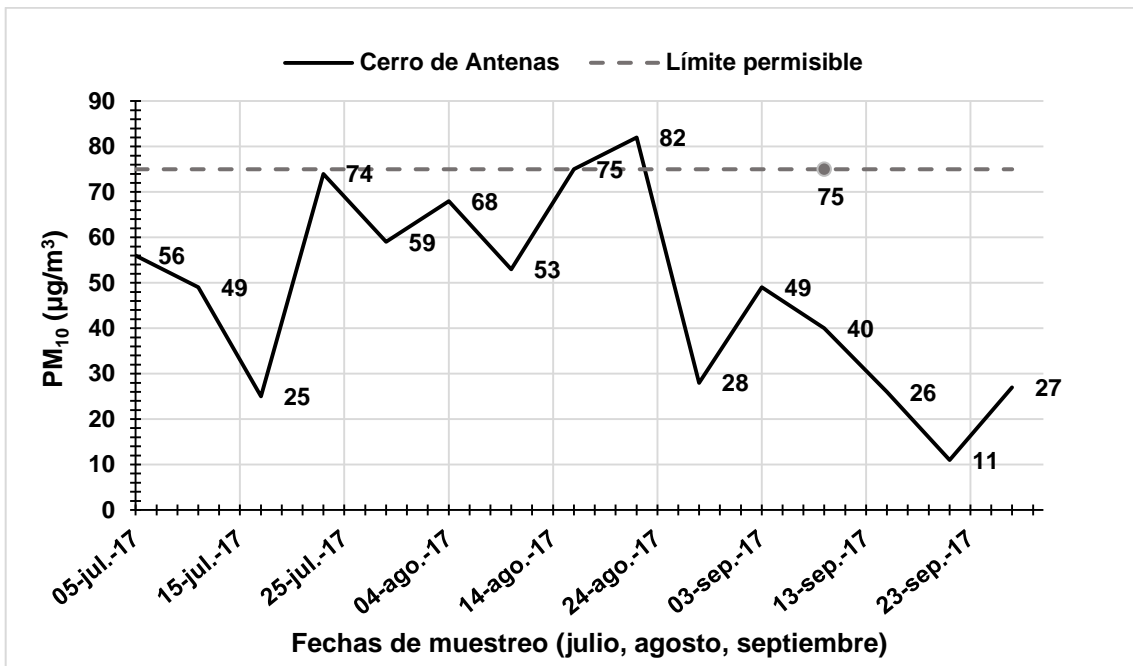


Figura 9. Comportamiento de la concentración de PM₁₀ durante el Trimestre 3 (julio a septiembre de 2017) en el monitor Cerro de Antenas.

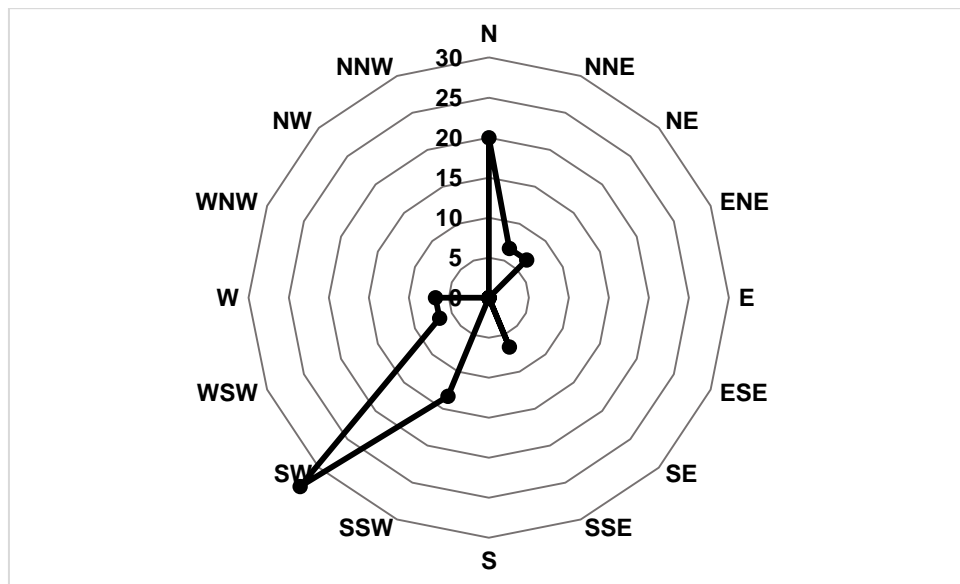


Figura 10. Direcciones de procedencia de los vientos durante el Trimestre 3 (julio, agosto, septiembre).

Trimestre 4 (octubre, noviembre, diciembre)

Finalmente, este último trimestre no presentó ningún resultado fuera de límite permisible cuyas concentraciones obtenidas, se encuentran muy por abajo de lo que indica la Normatividad Mexicana, presentando resultados que van de 8 hasta 41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 11, Anexo B: Tabla B-2). En la dirección de los vientos no se observó un origen predominante durante este trimestre (Figura 12); sin embargo, tanto las velocidades como las temperaturas fueron bajas, y al igual que en el tercer trimestre, se presentaron lluvias (Anexo C; Tabla C-4), las cuales permitieron de manera natural mejorar la calidad del aire.

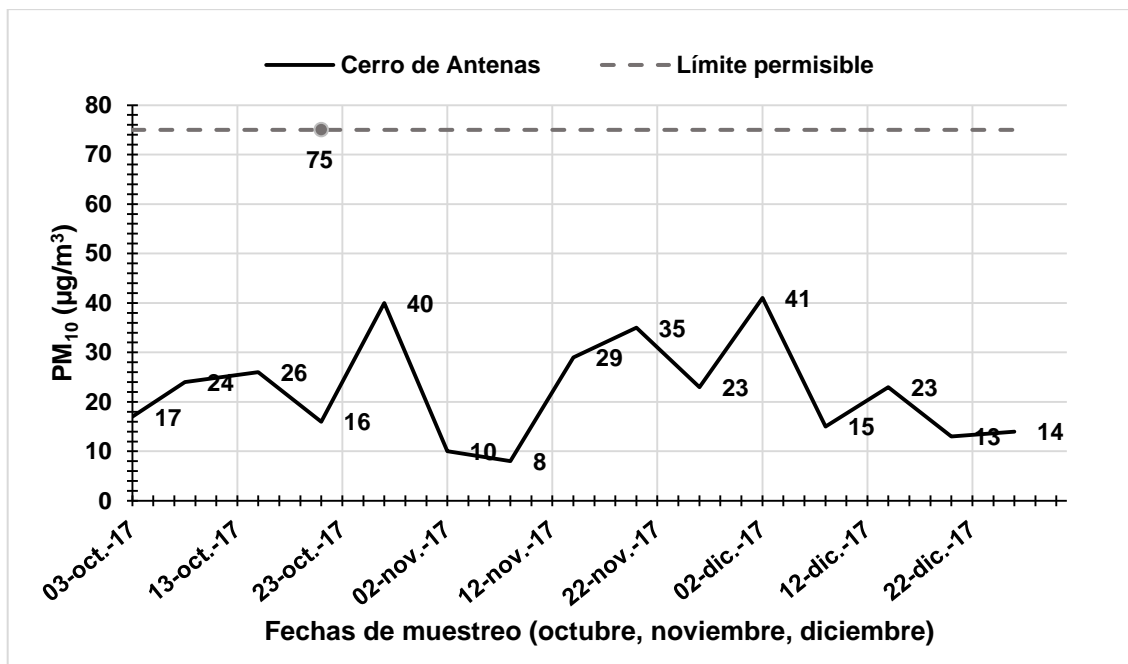


Figura 11. Comportamiento de la concentración de PM₁₀ durante el Trimestre 4 (octubre, noviembre, diciembre de 2017) en el monitor Cerro de Antenas.

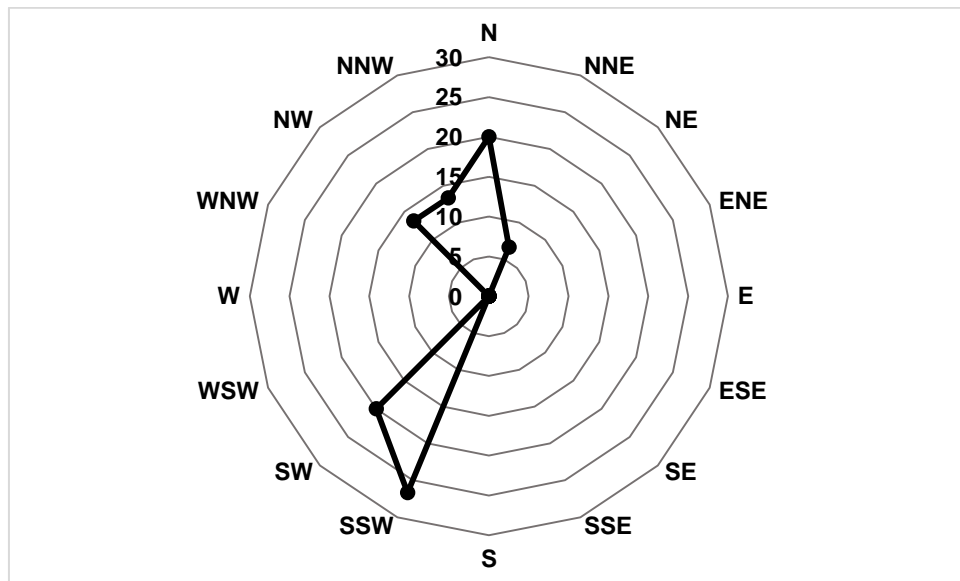


Figura 12. Direcciones de procedencia de los vientos durante el Trimestre 4 (octubre, noviembre, diciembre).

IV.1.2. Comportamiento de los Promedios Mensuales de PM_{10}

Como ya se mencionó en el análisis trimestral, los meses de abril y junio son los punteros en días en los que se sobrepasó el límite permisible diario, y realizando el promedio de los resultados por mes, tanto junio, abril y mayo son los que presentaron concentraciones por encima del límite, con resultados de 92, 79.2 y 82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

En el segundo semestre del año los promedios mensuales son muy bajos, ninguno de estos sobrepasa la Norma, siendo el más alto en agosto con 61.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, siguiéndole julio con 52.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre sus promedios mensuales van de 21 a 30.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabla X).

Tabla X. Promedio de concentraciones mensuales para PM₁₀ en monitor Cerro de Antenas.

Cerro de Antenas PM ₁₀ (2017)		
Mes	Promedio	>75 µg/m ³
Enero	43.6	1
Febrero	41	0
Marzo	69.83	2
Abril	82	4
Mayo	79.2	2
Junio	92	3
Julio	52.6	0
Agosto	61.2	2
Septiembre	30.6	0
Octubre	24.6	0
Noviembre	21	0
Diciembre	21.2	0

IV.1.3. Comportamiento del Promedio Anual

La normatividad Mexicana indica un límite promedio anual para la concentración de material particulado de diámetro aerodinámico igual o menor a 10 micras en el aire ambiente, el cual se establece en la Norma Mexicana NOM-025-SSA1-2014 (DOF, 2014) y es de 40 µg/m³. Para el caso de los resultados obtenidos por el monitor Cerro de Antenas se presenta la concentración anual máxima siendo esta de 52.05 (µg/m³) resultando mayor al límite permisible, incumpléndose la Normatividad Mexicana a nivel anual.

IV.1.4. Días de Buena, Regular y Mala Calidad del Aire Respecto de PM₁₀

Se evaluaron los resultados para PM₁₀ en base al Criterio de Días de Buena, Regular y Mala Calidad del Aire (Secretaría del Medio Ambiente, 2017), con el fin de evaluar la cantidad de días con Mala calidad del aire, en consideración del número de muestras válidas tomadas en el monitor Cerro de Antenas.

Se puede observar, que el segundo trimestre del año es el intervalo de tiempo donde más días de Mala calidad se presentaron y además durante dicho trimestre no se presentan días de Buena calidad, lo cual concuerda con los análisis anteriores donde el Trimestre 2 había presentado más ocasiones en las que se sobrepasaba el límite permisible. Por el contrario, el trimestre con la mejor calidad del aire fue el cuarto (octubre, noviembre, diciembre) donde sólo se presentó un día de calidad Regular y los demás días fueron de Buena (Figura 13).

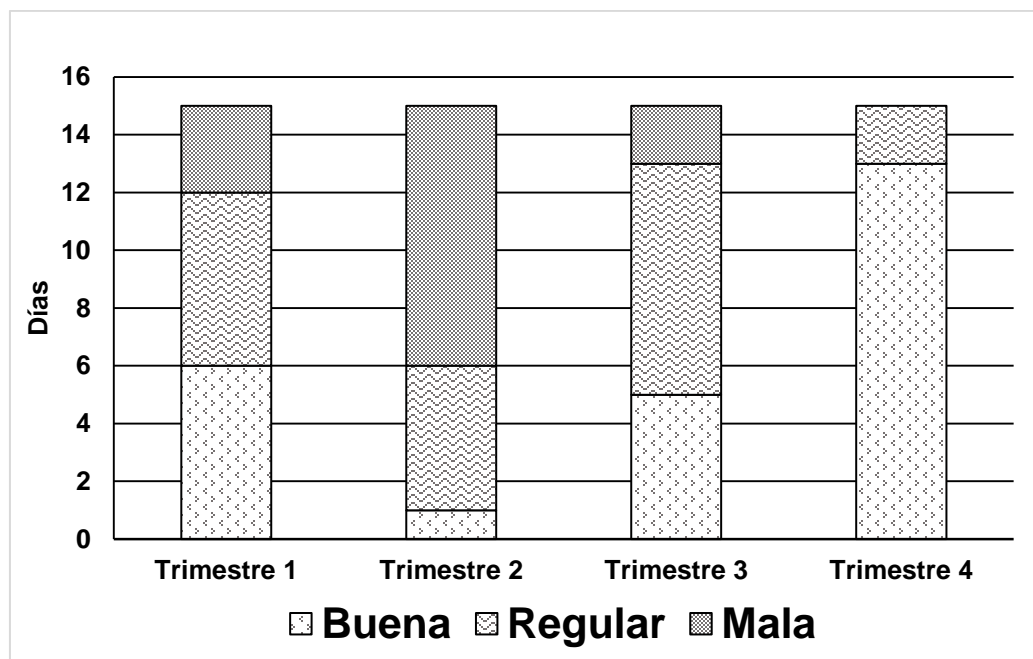


Figura 13. Días de Buena, Regular y Mala Calidad del Aire por Trimestre en el Monitor Cerro de Antenas.

En base a este indicador de calidad del aire, se puede observar que cerca del 25% de los días muestreados resultaron ser de Mala calidad (Figura 14).

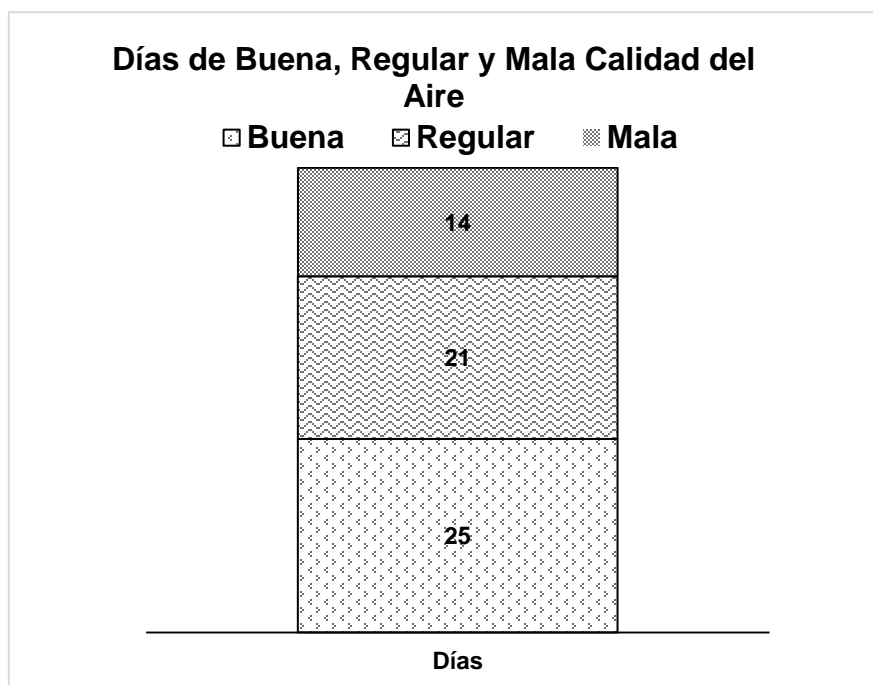


Figura 14. Días de Buena, Regular y Mala Calidad del Aire durante el ciclo Anual 2017.

IV.1.5. Comparativo con Respecto a otros Monitores de la Región de Cananea en Muestreo Trimestral de PM₁₀

Para un análisis más amplio, se realizó la comparación de los resultados del monitor Cerro de Antenas para PM₁₀, con los resultados obtenidos a partir de otras estaciones de monitoreo ubicadas en la región de Cananea durante el mismo ciclo anual (2017); dichas estaciones son Casa Grande e Instituto Minerva; ambos monitores ubicados en la ciudad, y la estación TEC localizada en la mina (Figura 15).

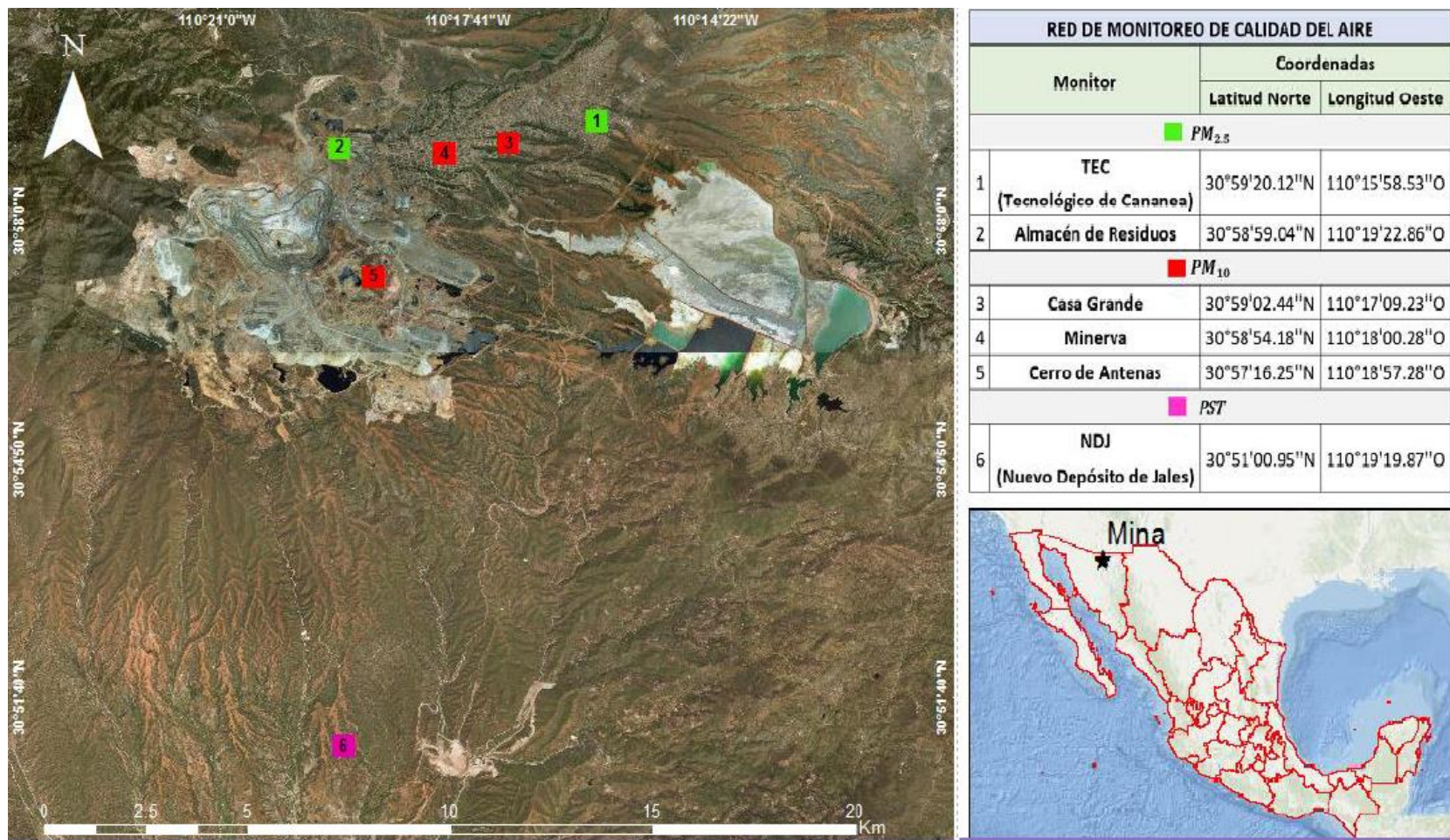


Figura 15. Ubicación de las estaciones de monitoreo en la Cd. de Cananea, Sonora, y en el Complejo Minero.

Durante el ciclo anual 2017, en la región de Cananea se realizó el monitoreo de PM₁₀ en 4 estaciones, en el primer trimestre este análisis tuvo lugar en Casa Grande, Cerro de Antenas y TEC, donde posteriormente, en el segundo trimestre, se hizo el cambio del monitor TEC al monitor Minerva, ya que la estación TEC se utilizaría para monitorear PM_{2.5}, con lo cual, es importante mencionar que debido a este cambio los resultados obtenidos de dichos monitores (TEC y Minerva) no cumplen con el criterio de cobertura de datos, por lo que su comparación con los resultados del presente estudio no tiene validez.

El conteo del número de veces fuera del límite normado (DOF, 2014) fue mayor en el monitor Cerro de Antenas, en comparación con los resultados obtenidos del monitor Casa Grande, esto se puede justificar con el hecho que la ubicación de los monitores es muy distinta, y las condiciones son diferentes, ya que el monitor Casa Grande se encuentra ubicado en la ciudad de Cananea, alejado de las actividades mineras que podrían ser las causales de los resultados anómalos en nuestro estudio (Tabla XI, Figura 16).

Tabla XI. Número de veces fuera del límite diario normado para PM₁₀ por estación de monitoreo en la región de Cananea, Sonora.

Dato anual	Cerro de Antenas	TEC	Instituto Minerva	Casa Grande
Numero de conteos	60	22	38	60
Veces fuera de límite	13	18	5	10
% Fuera del límite	21.67	81.82	13.16	16.67

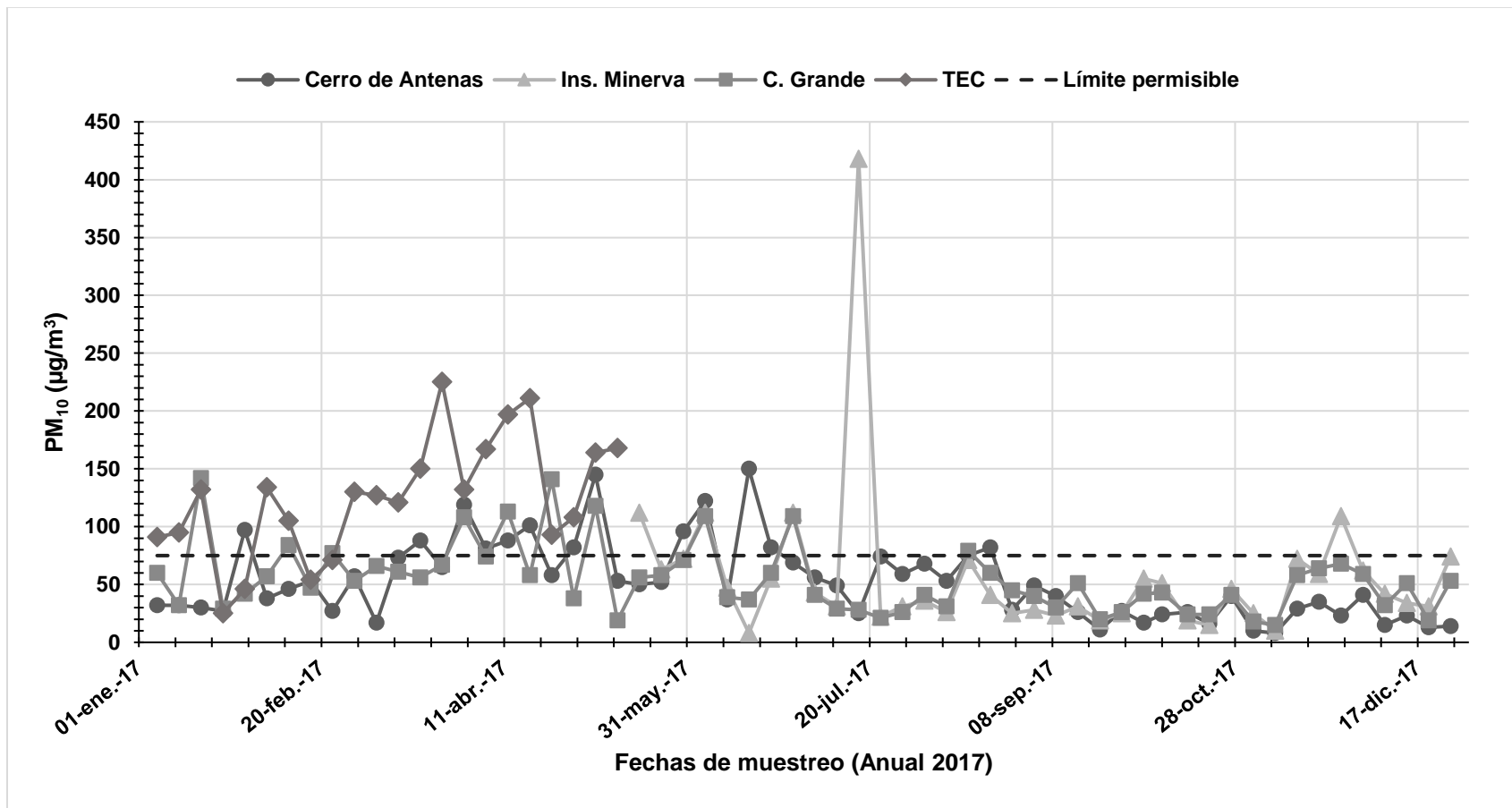


Figura 16. Comportamiento de la concentración de PM₁₀ durante el ciclo anual 2017, para los cuatro monitores ubicados en la región de Cananea, Son.

IV.2. Metales Potencialmente Tóxicos (Cu, Fe, Mn, Pb)

IV.2.1. Comportamiento de las Concentraciones de Metales

Cobre (Cu)

Las concentraciones de este metal para el ciclo anual 2017 rondaron como máximo un valor de $0.655 \mu\text{g}/\text{m}^3$, durante el primer trimestre del año (30 de enero), y mínimos de $0.069 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ocurrido durante el trimestre 4 (02 de noviembre). De manera general, el promedio anual de la concentración de cobre es de $0.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo los trimestres con las concentraciones más altas el segundo y tercero del ciclo anual (Anexo D: Tabla D-1 y Tabla D -2).

Hierro (Fe)

Los resultados obtenidos para el hierro presentaron concentraciones a máximas de $5.213 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (17 de junio) y hasta mínimos de $0.261 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (08 de noviembre). Desde el punto de vista anual, el promedio de la concentración quedó en $1.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ resultando el segundo trimestre del año 2017 con la concentración promedio más alta (Anexo D: Tabla D-1 y Tabla D -2).

Manganeso (Mn)

El metal manganeso, presentó un rango de concentración con un valor máximo de $0.187 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (17 de junio) y mínimo de $0.003 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (08 de diciembre). El promedio anual de las concentraciones diarias monitoreadas para este metal fue de $0.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el trimestre que presentó el valor más alto es el segundo trimestre (Anexo D: Tabla D-1 y Tabla D -2).

Plomo (Pb)

El plomo presentó una situación distinta a la de los anteriores metales, ya que este no arrojó resultados de concentración detectables, por lo tanto, para el efecto de este estudio el comportamiento de este metal se reporta con resultados en concentraciones No Detectables (ND) (Anexo D: Tabla D-1 y Tabla D -2).

IV.2.2. Comparación de las Concentraciones de Metales con los Límites Permisibles

Cobre (Cu)

Para el metal cobre no existe regulación en México que establezca un límite máximo de concentración en el aire ambiente. En este estudio se consideró como límite permisible el reportado por el Criterio de Calidad del Aire del Ministerio de Ambiente de Ontario (OME, 2012), el cual es de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ diario. En la Figura 17, se presenta el comportamiento de las concentraciones de cobre en el monitor Cerro de Antenas durante el ciclo anual. Se observa que estas distan mucho del límite máximo permisible, siendo la concentración máxima detectada de $0.655 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por lo que se considera que no representan un peligro para la salud de la población que radica en áreas aledañas al complejo minero.

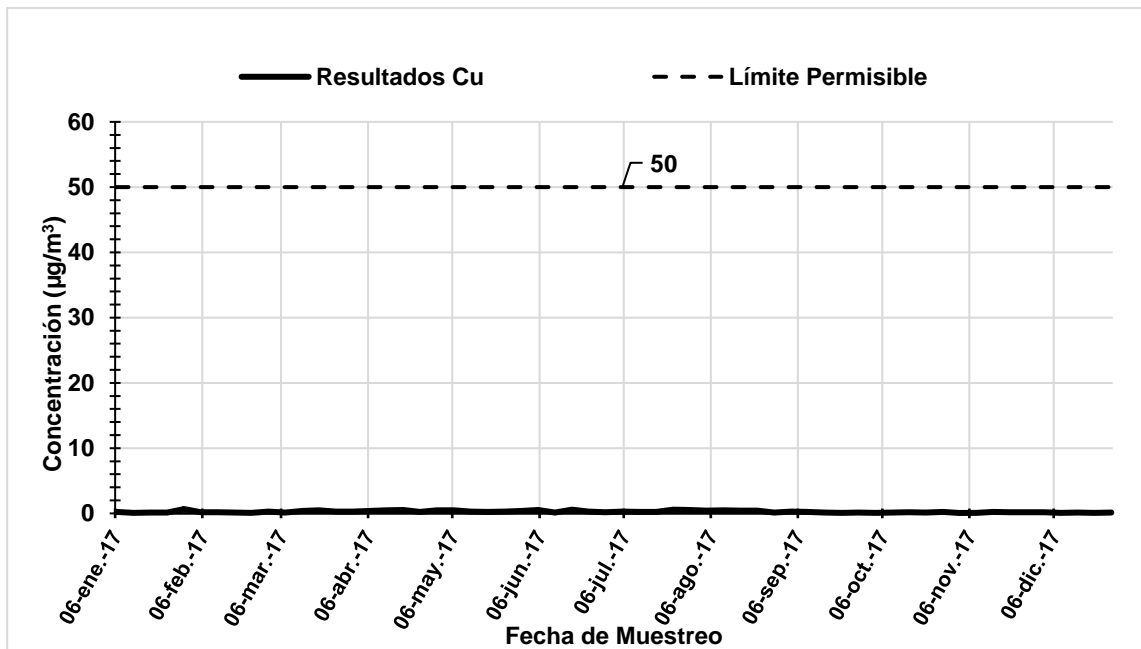


Figura 17. Comportamiento de las concentraciones de Cobre durante el muestreo anual (2017).

Hierro (Fe)

Para el análisis de este metal, se tomó como límite máximo permisible el establecido por el Criterio de Calidad del Aire del Ministerio de Ambiente de Ontario (OME, 2012), ya que en la Normatividad Mexicana actual no existe una regulación en aire ambiente para dicho metal. El límite permisible de la OME es de $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ diarios. Durante el ciclo anual 2017, en dos ocasiones se sobrepasó la concentración de $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la primera vez el 12 de abril, con $4.421 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la segunda el día 17 de junio, con una concentración de $5.213 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 18). Adicionalmente a estas ocasiones, también se tuvieron resultados muy cercanos al límite máximo sin llegar a sobrepasarlo, específicamente las concentraciones de $3.668 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $3.734 \mu\text{g}/\text{m}^3$ captadas el 30 de enero y 31 de marzo (Anexo D: Tabla D-1).

De manera general, las concentraciones obtenidas para este metal se mantuvieron dentro de los límites máximos permisibles, por lo que se considera que estas no representan un peligro para la población de la región; sin embargo, es importante darle seguimiento y tener vigilancia especial a las concentraciones emitidas de hierro y así evitar que estas sobrepasen en más ocasiones su máximo permisible pudiendo de esta manera representar un peligro para la salud, específicamente de los trabajadores del complejo minero.

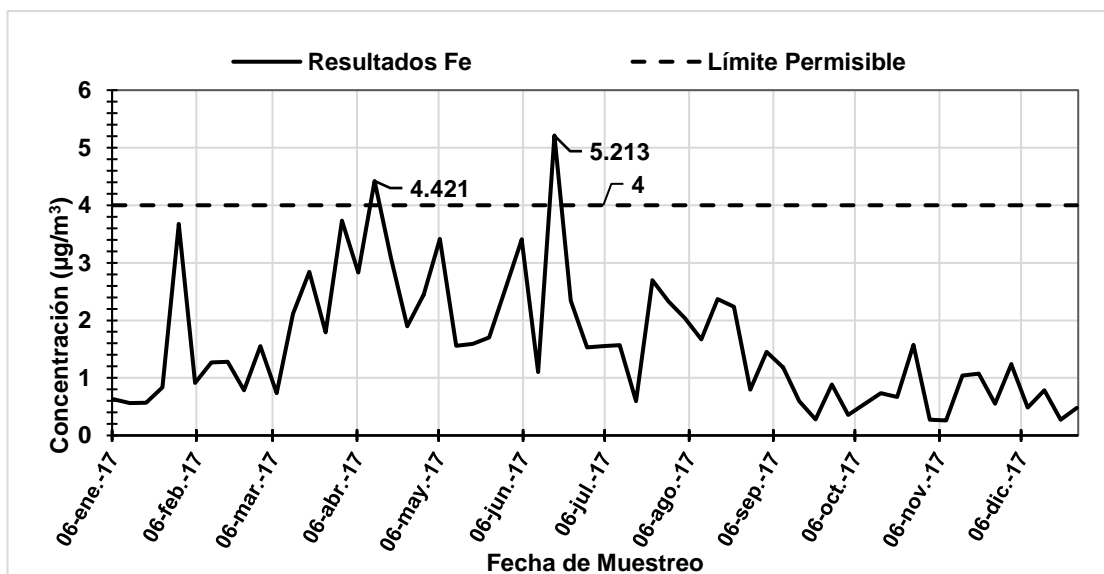


Figura 18. Comportamiento de las concentraciones de Hierro durante el muestreo anual (2017).

Manganeso (Mn)

Así como es el caso de los anteriores metales, para el manganeso no existe un límite de concentración máxima en aire establecido por la Normatividad en México. El Criterio de Calidad del Aire del Ministerio de Ambiente de Ontario presenta un límite diario de concentración para el manganeso de $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (OME, 2012). Al comparar los resultados obtenidos en este trabajo con el límite de la OME, se observa que estos en su totalidad se encuentran por abajo de dicho máximo permisible, y que su valor más cercano a este límite es el obtenido el 17 de junio, siendo de $0.187 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 19). Aunque la regulación de este límite máximo se estableció para condiciones normales y no de operaciones industriales como lo son las actividades adyacentes al monitor Cerro de Antenas, aun así, se puede considerar apto este límite para el presente trabajo, ya que las concentraciones de manganeso se encuentran por debajo de él, no representando un peligro para la salud humana.

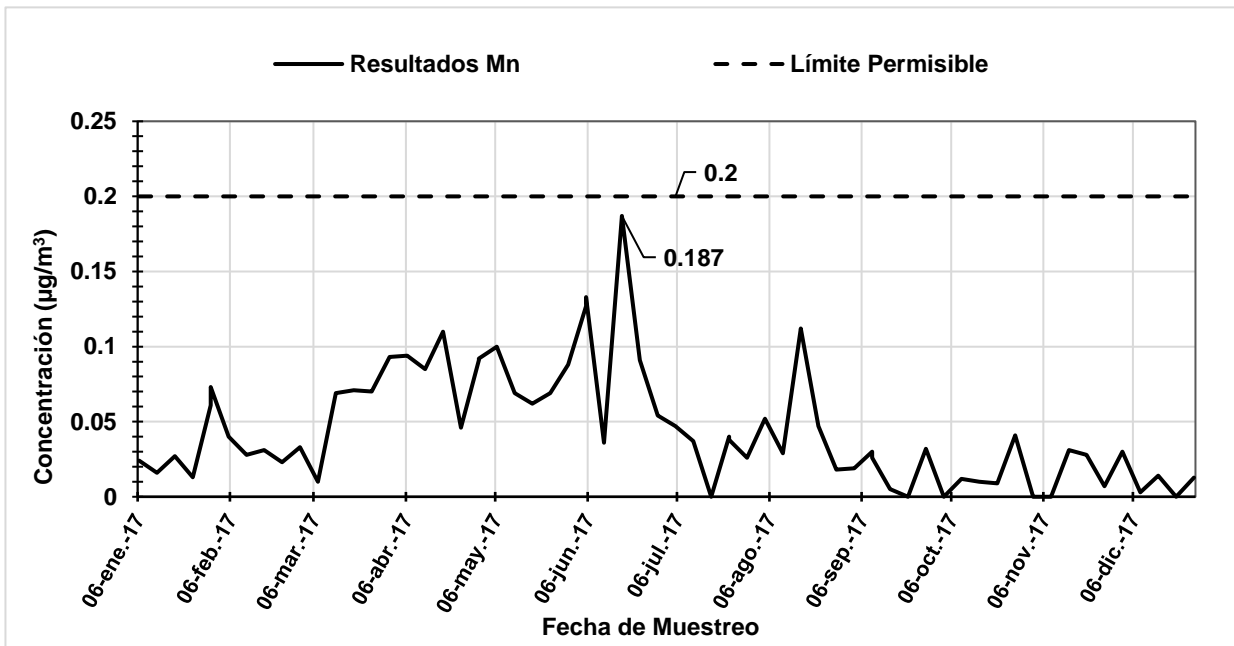


Figura 19. Comportamiento de las concentraciones de Manganeso durante el muestreo anual (2017).

Plomo (Pb)

La Normatividad Mexicana tiene un límite establecido para el plomo en la NOM-026-SSA1-1993, el cual es de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de promedio de concentración trimestral; de igual manera que con los anteriores metales, el Criterio de Calidad del Aire del Ministerio de ambiente de Ontario presenta un límite máximo permisible de plomo de $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio diario. Sin embargo, ya que los resultados obtenidos para este metal se encuentran abajo del límite de detección de la técnica de análisis ($0.075 \mu\text{g}/\text{m}^3$), se puede considerar que las concentraciones de dicho metal no se encuentran en magnitudes que resulten dañinas para la salud de la población ni que afecten el medio ambiente de la región (Anexo D: Tabla D-1 y Tabla D -2).

IV.3. Comparación de los Resultados Obtenidos con Respecto a Estudios Similares a Nivel Regional, Nacional e Internacional

Regional

Debido a la escasa información pública que existe sobre el estudio de la calidad del aire para metales y PM_{10} a nivel regional, se vio la necesidad de recurrir al uso de fuentes de información internacionales. Gracias a que el Estado de Sonora tiene frontera con los Estados Unidos de América, se tomaron datos recabados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, 2018) , la cual realiza la recolección y difusión de la información colectada en los monitores ubicados en algunas ciudades fronterizas de México. Dicha información se encuentra de manera pública en su *Mapa Interactivo de Calidad del Aire*. De esta fuente se colectaron las concentraciones máximas para PM_{10} obtenidas durante el ciclo anual 2010, para las ciudades de Agua Prieta y Nogales las cuales fueron 210 y $175 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente; así mismo, a nivel regional se tiene el dato recabados por la Comisión de Ecología y Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora (CEDES, 2017) del monitor ubicado en la zona norte de la ciudad de Hermosillo, el cual reporta en el ciclo anual 2010 un máximo de concentración de PM_{10} de $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De estos tres datos a nivel regional, los reportados por las ciudades de Agua Prieta y Nogales presentan una diferencia porcentual superior a la del máximo de

concentracion reportado en este trabajo ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$), siendo esta 40% superior en la ciudad de Agua Prieta y 17% para la ciudad de Nogales. A diferencia de estos, el máximo de concentracion reportado en la ciudad de Hermosillo es de $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el cual es menor al reportado en la Región de Cananea.

Por las causas ya comentadas respecto a la falta de información pública sobre PM_{10} y metales a nivel regional, no fue posible realizar una comparación de los datos de metales obtenidos en este trabajo con los de algún otro estudio en el Estado de Sonora.

Nacional

A nivel nacional, se realizó la comparación con las concentraciones máximas reportadas para la ciudad de Monterrey (González-Santiago et al., 2011), Mexicali (Canales et al., 2014) y Puebla (Morales-García et al., 2014) las cuales para PM_{10} presentaron los resultados 158.9, 163.34 y $199.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, de los cuales los primeros dos resultaron muy similares al obtenido en este trabajo, con una diferencia porcentual del 6 y 8%; mientras que el reportado por la ciudad de Puebla tiene una diferencia porcentual de 33%.

Para la comparación de metales a nivel nacional, ésta solamente se pudo realizar con la ciudad de Puebla (Morales-García et al., 2014), la cual presentó resultados dentro de los límites evaluados en este trabajo; las concentraciones fueron las siguientes: Cu ($0.0866 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Fe ($1.2025 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Mn ($0.0355 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y Pb ($0.0489 \mu\text{g}/\text{m}^3$), los cuales en comparación a los resultados de este trabajo, son muy similares, con el detalle a mencionar que en dicho estudio sí presentaron resultados detectables para el metal plomo.

Internacional

Finalmente, a nivel internacional se realizó la comparación con los resultados de los estudios realizados en Riohacha, Colombia (Rojano et al., 2013), Río de Janeiro; Brasil (Toledo et al., 2008) y Guanzhou, China (Wang et al., 2006), los cuales para PM_{10} presentaron máximos de concentración anual de 28.79, 169 y 152 $\mu g/m^3$ respectivamente. De los cuales, el presentado en Riohacha, Colombia, se encuentra muy por abajo de los resultados de Río de Janeiro y Guanzhou. En comparación con el resultado de concentración máxima obtenido en este trabajo ($150 \mu g/m^3$), tanto Río de Janeiro como Guanzhou, son muy cercanos a este, teniendo diferencias del 13% y 1%.

La comparación de metales a nivel internacional se realizó con los resultados de las ciudades Río de Janeiro y Guanzhou, ya que el estudio realizado en Riohacha únicamente realizó análisis para PM_{10} . Río de Janeiro reporta las concentraciones máximas de metales para el periodo 2004-2005 de Cu ($0.022 \mu g/m^3$), Fe ($0.775 \mu g/m^3$), Mn ($0.016 \mu g/m^3$) y Pb ($0.0159 \mu g/m^3$); y la Ciudad de Guanzhou: Cu ($0.078 \mu g/m^3$), Fe ($0.178 \mu g/m^3$), Mn ($0.221 \mu g/m^3$), Pb ($0.466 \mu g/m^3$). De estos estudios, se observó que los resultados de ambos estudios se encuentran dentro de los límites evaluados en este trabajo, y que en ambas situaciones existen concentraciones detectables del metal plomo.

A continuación, se presenta la Tabla XII donde se resumen las concentraciones de los estudios con los que se realizó la comparación, así como las concentraciones máximas (PM_{10}) y promedio (metales) reportadas en este trabajo.

Tabla XII. Comparación de los resultados obtenidos del monitor Cerro de Antenas con los de otras ciudades a nivel regional, nacional e internacional.

Ciudad	Año	Referencia	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					
			Máx.	Promedio				
			PM ₁₀	Cu	Fe	Mn	Pb	
Nivel	Cananea	2017	Presente estudio	150	0.28	1.66	0.05	ND
Regional	Agua Prieta	2010	Environmental Protection Agency, 2018.	210	NA	NA	NA	NA
	Nogales	2010	Environmental Protection Agency, 2018.	175	NA	NA	NA	NA
	Hermosillo	2011	CEDES, 2017.	90	NA	NA	NA	NA
Nacional	Monterrey	2006-2008	González et al., 2011.	158.9	NA	NA	NA	NA
	Mexicali	2011	Canales-et al., 2014.	163.34	NA	NA	NA	NA
	Puebla	2008-2011	Morales-García et al., 2014.	199.2	0.0866	1.2025	0.0355	0.0489
Internacional	Riohacha, Colombia	2010-2011	Salini et al., 2017.	28.79	NA	NA	NA	NA
	Rio de Janeiro, Brasil	2004-2005	Toledo et al., 2008.	169	0.022	0.775	0.016	0.0159
	Guanzhou, China	2004	Wang et al., 2006.	152.09	0.078	0.178	0.221	0.466

NA= No Analizado
 ND= No Detectable

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V.1. Conclusiones

Se consideran válidos los resultados de este estudio, debido al criterio de cobertura de datos que presenta, así como los estándares de calidad que se obtuvieron.

Para el Material Particulado (PM_{10}), se concluye que en comparación con el límite máximo permisible de 24 horas ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$), este se cumple en un 77% de los días muestreados y esto concuerda con la comparación que se realizó con el Criterio de Días de Buena, Regular y Mala Calidad del Aire, donde poco más del 75% de los días tuvo calidad Buena o Regular. Sin embargo, al compararse los resultados del promedio anual $52.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con el límite máximo permisible $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para este periodo de tiempo, se incumple lo establecido en la Normatividad Mexicana.

Se consideran satisfactorios los resultados obtenidos para los metales cobre, manganeso y plomo, puesto que las concentraciones detectadas se encontraron muy por abajo de los límites de comparación permisibles, mientras que para hierro, presentó un comportamiento donde en dos ocasiones se sobrepasó el límite diario, por lo que se considera que estas no representan un peligro para la población de la región.

Se acepta parcialmente la hipótesis de trabajo, la cual establecía que las concentraciones de material particulado menor a 10 micras (PM_{10}) y metales (Cu, Fe, Mn, Pb) en el aire ambiente de la Ciudad de Cananea, Sonora, México, rebasarían los máximos permisibles dando como resultado una mala calidad del aire para el periodo anual 2017, se considera mala la calidad del aire del aire con respecto al límite diario y al límite anual de PM_{10} , mientras que para los metales Cu, Mn y Pb, los niveles de concentración en el aire ambiente son aceptables y satisfactorios puesto que en ninguna ocasión se rebasó el límite máximo, únicamente en el caso del Fe se considera que incumple.

Basados en los resultados monitoreados por la estación Cerro de Antenas, se puede considerar la Calidad del Aire como Mala para la Región dentro del complejo minero en Cananea, Sonora.

V.2. Recomendaciones

Se recomienda continuar con el monitoreo en la región de Cananea, evaluándose el estudio de otros metales y metaloides (Cd, Cr, Mo, Zn, Hg, As, Si).

A las instancias correspondientes, se les sugiere trabajar en el establecimiento de programas de reforestación y pavimentación de calles con la finalidad de disminuir el promedio de las concentraciones diarias y anuales de PM_{10} y metales, específicamente del hierro, asimismo, crear programas de educación ambiental, establecerlos en la comunidad y en el personal que labora dentro del complejo minero, siendo estos enfocados a temas relacionados al cuidado del medio ambiente, específicamente en el origen y liberación de partículas al aire.

Finalmente, se recomienda utilizar un modelo matemático para calcular la dispersión de los contaminantes del aire ambiente en la región de Cananea, Sonora.

ANEXOS

ANEXO A. Control de Calidad en el Análisis y Cuantificación de Metales (Cu, Fe, Mn, Pb).

Tabla A-1. Resultados del análisis de metales ($\mu\text{g/mL}$) realizado en los blancos de digestión (filtros), correspondiente a los muestreos realizados de enero a junio (2017).

Blancos	Cu	Fe	Mn	Pb
Blanco 1	0.01	ND< LD	ND< LD	ND< LD
Blanco 2	0.011	ND< LD	ND< LD	ND< LD
Blanco 3	0.009	ND< LD	ND< LD	ND< LD
LD	0.02	0.04	0.02	0.06

LD = Límite de Detección.

ND = No Detectable.

Tabla A-2. Resultados del análisis de metales ($\mu\text{g/mL}$) realizado en los blancos de digestión (filtros), correspondiente a los muestreos realizados de julio a diciembre (2017).

Blancos	Cu	Fe	Mn	Pb
Blanco 1	0.055	0.032	ND< LD	ND< LD
Blanco 2	0.052	0.037	ND< LD	ND< LD
Blanco 3	0.044	0.031	ND< LD	ND< LD
LD	0.02	0.04	0.02	0.06

LD = Límite de Detección.

ND = No Detectable.

Tabla A-3. Parámetros de calidad utilizados en la Calibración del Equipo de Absorción Atómica durante análisis de enero a junio.

Metal	Curva de Calibración	Límite de Detección (µg/ml)	Límite de Detección (µg//m³)	Coefficiente de correlación (r)
Cu	0.20, 0.50, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	0.02	0.025	0.999
Fe	0.20, 0.50, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	0.04	0.05	0.9991
Mn	0.20, 0.50, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	0.02	0.025	0.9999
Pb	0.20, 0.50, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	0.06	0.075	0.9998

Tabla A-4. Parámetros de calidad utilizados en la Calibración del Equipo de Absorción Atómica durante análisis de julio a diciembre.

Metal	Curva de Calibración	Límite de Detección (µg/ml)	Límite de Detección (µg//m³)	Coefficiente de correlación (r)
Cu	0.20, 0.50, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	0.02	0.025	0.9999
Fe	0.20, 0.50, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	0.04	0.05	0.9983
Mn	0.20, 0.50, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	0.02	0.025	0.9999
Pb	0.20, 0.50, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	0.06	0.075	0.9998

Tabla A-5. Control de calidad en las muestras duplicadas (Porcentaje de Desviación Porcentual) para el muestreo de enero a junio de 2017.

Metal	Muestra A	Muestra B (Duplicado)	DPR %	Muestra A	Muestra B (Duplicado)	DPR %
	30-ene-17			19-mar-17		
Cu	0.655	0.65	0.218	0.467	0.459	1.728
Fe	3.668	3.676	0.191	2.844	2.845	0.035
Mn	0.061	0.073	17.91	0.071	0.071	*
Pb	ND<LD	ND<LD	*	ND<LD	ND<LD	*
	30-abr-17			05-jun-17		
Cu	0.476	0.472	0.844	0.506	0.508	0.394
Fe	2.444	2.439	0.205	3.407	3.392	0.441
Mn	0.091	0.092	1.093	0.127	0.133	4.615
Pb	ND<LD	ND<LD	*	ND<LD	ND<LD	*

ND = No Detectable.

LD = Límite de Detección.

DPR = Diferencia Porcentual Relativa.

Tabla A-6 Control de calidad en las muestras duplicadas (Porcentaje de Desviación Porcentual) para el muestreo de julio a diciembre de 2017.

Metal	Muestra A	Muestra B (Duplicado)	DPR %	Muestra A	Muestra B (Duplicado)	DPR %
	23-jul-17			09-sep-17		
Cu	0.597	0.595	0.34	0.252	0.247	2
Fe	2.68	2.696	0.06	1.184	1.19	0.5
Mn	0.04	0.038	5.13	0.03	0.026	14.29
Pb	ND<LD	ND<LD	**	ND<LD	ND<LD	**
	08-nov-17			02-dic-17		
Cu	0.1	0.103	2.96	0.183	0.185	1.09
Fe	0.261	0.261	**	1.241	1.229	0.97
Mn	ND<LD	ND<LD	**	0.032	0.032	**
Pb	ND<LD	ND<LD	**	ND<LD	ND<LD	**

ND = No Detectable.

LD = Límite de Detección.

DPR = Diferencia Porcentual Relativa.

Tabla A-7. Resultados de muestras fortificadas con metales a tres niveles de concentración (0.50, 1.00 y 2.00 µg/mL), para el muestreo de enero a junio de 2017.

Metal	C (µg/mL)	Recuperación (%)	C (µg/mL)	Recuperación (%)	C (µg/mL)	Recuperación (%)
Cu	0.5	106.33	1	109.66	2	103
Fe	0.5	101.07	1	104.8	2	102.07
Mn	0.5	94	1	97.7	2	100.38
Pb	0.5	91.63	1	98.69	2	99.4

C= Concentración.

Tabla A-8. Resultados de muestras fortificadas con metales a tres niveles de concentración (0.50, 1.00 y 2.00 µg/mL), para el muestreo de julio a diciembre de 2017.

Metal	C (µg/mL)	Recuperación (%)	C (µg/mL)	Recuperación (%)	C (µg/mL)	Recuperación (%)
Cu	0.5	98.47	1	99.17	2	102.1
Fe	0.5	100.07	1	101.9	2	102.62
Mn	0.5	95.13	1	96.23	2	99.86
Pb	0.5	96.32	1	97.11	2	100.44

C= Concentración.

ANEXO B. Concentraciones Trimestrales para PM₁₀ en el Monitor Cerro de Antenas.

Tabla B-1 Concentraciones de PM₁₀ para los trimestres 1 y 2 en el monitor Cerro de Antenas.

Trimestre 1		Trimestre 2	
Fecha	Concentración (µg/m³)	Fecha	Concentración (µg/m³)
06-ene-17	32	06-abr-17	81
12-ene-17	32	12-abr-17	88
18-ene-17	30	18-abr-17	101
24-ene-17	27	24-abr-17	58
30-ene-17	97	30-abr-17	82
05-feb-17	38	06-may-17	145
11-feb-17	46	12-may-17	53
17-feb-17	53	18-may-17	50
23-feb-17	27	24-may-17	52
01-mar-17	57	30-may-17	96
07-mar-17	17	05-jun-17	122
13-mar-17	73	11-jun-17	37
19-mar-17	88	17-jun-17	150
25-mar-17	65	23-jun-17	82
31-mar-17	119	29-jun-17	69

Tabla B-2. Concentraciones de PM₁₀ para los trimestres 3 y 4 en el monitor Cerro de Antenas.

Trimestre 3		Trimestre 4	
Fecha	Concentración (µg/m³)	Fecha	Concentración (µg/m³)
05-jul-17	56	03-oct-17	17
11-jul-17	49	08-oct-17	24
17-jul-17	25	15-oct-17	26
23-jul-17	74	21-oct-17	16
29-jul-17	59	27-oct-17	40
04-ago-17	68	02-nov-17	10
10-ago-17	53	08-nov-17	8
16-ago-17	75	14-nov-17	29
22-ago-17	82	20-nov-17	35
28-ago-17	28	26-nov-17	23
03-sep-17	49	02-dic-17	41
09-sep-17	40	08-dic-17	15
15-sep-17	26	14-dic-17	23
21-sep-17	11	20-dic-17	13
27-sep-17	27	26-dic-17	14

ANEXO C. Información Climatológica de la Región de Cananea por Trimestre.

Tabla C-1. Información climatológica del trimestre 1 (enero, febrero, marzo) del ciclo anual 2017.

Día	Velocidad (m/s)	Dirección	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Presión (mmHg)	Precipitación (mm)
06-ene-17	8	W	11	53	759	0
12-ene-17	8	S	12	31	760	0
18-ene-17	5	WNW	8	63	763	0
24-ene-17	13	SW	5	67	758	0
30-ene-17	9	NW	10	30	766	0
05-feb-17	10	WSW	15	28	761	0
11-feb-17	15	SW	17	33	761	0
17-feb-17	18	SSW	10	59	760	0
23-feb-17	22	SW	11	44	757	0
01-mar-17	10	N	11	50	766	0
07-mar-17	8	N	15	29	765	0
13-mar-17	10	NNW	20	17	761	0
19-mar-17	9	N	22	18	761	0
25-mar-17	14	NNW	16	22	761	0
31-mar-17	24	SW	12	29	753	0

Tabla C-2. Información climatológica del trimestre 2 (abril, mayo, junio) del ciclo anual 2017.

Día	Velocidad (m/s)	Dirección	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Presión (mmHg)	Precipitación (mm)
06-abr-17	10	NNW	20	14	760	0
12-abr-17	10	N	20	12	758	0
18-abr-17	12	N	22	14	759	0
24-abr-17	21	SSW	20	17	754	0
30-abr-17	8	NNW	20	17	756	0
06-may-17	21	SSW	21	28	754	0
12-may-17	12	NNW	22	27	756	0
18-may-17	15	SSW	17	38	754	0
24-may-17	14	SW	27	10	764	0
30-may-17	10	WSW	23	21	756	0
06-jun-17	8	NNE	27	23	755	0
11-jun-17	21	SSW	23	21	756	0
17-jun-17	9	NNE	28	11	754	0
23-jun-17	10	NE	29	35	754	0
29-jun-17	16	WSW	26	37	756	0

Tabla C-3. Información climatológica del trimestre 3 (julio, agosto, septiembre) del ciclo anual 2017.

Día	Velocidad (m/s)	Dirección	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Presión (mmHg)	Precipitación (mm)
05-jul-17	11	SW	26	43	758	0
11-jul-17	9	W	22	62	758	5
17-jul-17	7	SW	20	85	759	1
23-jul-17	5	N	20	88	758	10
29-jul-17	6	N	20	83	760	0
04-ago-17	5	NNE	23	70	759	1
10-ago-17	8	SSE	23	66	757	14
16-ago-17	8	WSW	23	42	758	0
22-ago-17	6	SSW	26	49	759	0
28-ago-17	11	NE	25	37	757	0
03-sep-17	6	SW	24	52	760	0
09-sep-17	6	N	22	65	759	1
15-sep-17	16	SW	21	66	756	0
21-sep-17	13	SSW	20	74	756	0
27-sep-17	8	SW	19	33	757	0

Tabla C-4. Información climatológica del trimestre 4 (octubre, noviembre, diciembre) del ciclo anual 2017.

Día	Velocidad (m/s)	Dirección	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Presión (mmHg)	Precipitación (mm)
03-oct-17	11	SSW	22	36	757	0
08-oct-17	16	SSW	21	23	754	0
15-oct-17	13	N	23	26	761	0
21-oct-17	10	SSW	18	46	759	0
27-oct-17	7	NNW	21	18	757	0
02-nov-17	16	SW	16	60	762	0
08-nov-17	8	N	15	60	761	2
14-nov-17	7	NW	23	18	760	0
20-nov-17	9	NNW	17	27	762	0
26-nov-17	10	N	22	16	761	0
02-dic-17	7	NW	17	33	761	0
08-dic-17	24	NNE	4	41	773	0
14-dic-17	10	SW	12	40	760	0
20-dic-17	10	SSW	11	43	765	0
26-dic-17	6	SW	15	16	764	0

ANEXO D. Concentraciones Trimestrales para Metales (Cu, Fe, Mn, Pb) en el Monitor Cerro de Antenas.

Tabla D-1 Metales pesados ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en PM_{10} en el monitor Cerro de Antenas, en Cananea, Sonora, durante los Trimestres 1 y 2 de 2017.

Fecha de Muestreo	Trimestre 1				Fecha de Muestreo	Trimestre 2			
	Cu	Fe	Mn	Pb		Cu	Fe	Mn	Pb
06-ene-17	0.208	0.627	0.024 (<LD)	ND (<LD)	06-abr-17	0.389	2.834	0.094	ND (<LD)
12-ene-17	0.086	0.565	0.016 (<LD)	ND (<LD)	12-abr-17	0.463	4.421	0.085	ND (<LD)
18-ene-17	0.141	0.568	0.027	ND (<LD)	18-abr-17	0.503	3.087	0.11	ND (<LD)
24-ene-17	0.111	0.834	0.013 (<LD)	ND (<LD)	24-abr-17	0.226	1.897	0.046	ND (<LD)
30-ene-17	0.655	3.668	0.061	ND (<LD)	30-abr-17	0.476	2.444	0.091	ND (<LD)
30-ene-17*	0.65	3.676	0.073	ND (<LD)	30-abr-17*	0.472	2.439	0.092	ND (<LD)
05-feb-17	0.17	0.912	0.04	ND (<LD)	06-may-17	0.484	3.416	0.1	ND (<LD)
11-feb-17	0.159	1.271	0.028	ND (<LD)	12-may-17	0.285	1.559	0.069	ND (<LD)
17-feb-17	0.134	1.282	0.031	ND (<LD)	18-may-17	0.234	1.594	0.062	ND (<LD)
23-feb-17	0.09	0.786	0.023 (<LD)	ND (<LD)	24-may-17	0.266	1.705	0.069	ND (<LD)
01-mar-17	0.286	1.55	0.033	ND (<LD)	30-may-17	0.397	2.555	0.088	ND (<LD)
07-mar-17	0.123	0.736	0.010 (<LD)	ND (<LD)	05-jun-17	0.506	3.407	0.127	ND (<LD)
13-mar-17	0.356	2.113	0.069	ND (<LD)	05-jun-17*	0.508	3.392	0.133	ND (<LD)
19-mar-17	0.467	2.844	0.071	ND (<LD)	11-jun-17	0.131	1.102	0.036	ND (<LD)
19-mar-17*	0.459	2.845	0.071	ND (<LD)	17-jun-17	0.571	5.213	0.187	ND (<LD)
25-mar-17	0.29	1.794	0.07	ND (<LD)	23-jun-17	0.28	2.343	0.091	ND (<LD)
31-mar-17	0.269	3.734	0.093	ND (<LD)	29-jun-17	0.17	1.5323	0.054	ND (<LD)

LD = Límite de Detección.

ND = No Detectable.

Tabla D -2 Metales pesados ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en PM_{10} en el monitor Cerro de Antenas, en Cananea, Sonora, durante los trimestres 3 y 4 de 2017.

Fecha de Muestreo	Trimestre 3				Fecha de Muestreo	Trimestre 4			
	Cu	Fe	Mn	Pb		Cu	Fe	Mn	Pb
05-jul-17	0.275	1.55	0.047	ND (<LD)	03-oct-17	0.099	0.358	ND (<LD)	ND (<LD)
11-jul-17	0.243	1.571	0.037	ND (<LD)	09-oct-17	0.11	0.544	0.012 (<LD)	ND (<LD)
17-jul-17	0.207	0.595	ND (<LD)	ND (<LD)	15-oct-17	0.189	0.733	0.010 (<LD)	ND (<LD)
23-jul-17	0.597	2.68	0.04	ND (<LD)	21-oct-17	0.118	0.667	0.009 (<LD)	ND (<LD)
23-jul-17*	0.595	2.696	0.038	ND (<LD)	27-oct-17	0.254	1.572	0.041	ND (<LD)
29-jul-17	0.542	2.328	0.026	ND (<LD)	02-nov-17	0.069	0.273	ND (<LD)	ND (<LD)
04-ago-17	0.428	2.034	0.052	ND (<LD)	08-nov-17	0.1	0.261	ND (<LD)	ND (<LD)
10-ago-17	0.492	1.669	0.029	ND (<LD)	08-nov-17*	0.103	0.261	ND (<LD)	ND (<LD)
16-ago-17	0.449	2.372	0.112	ND (<LD)	14-nov-17	0.224	1.041	0.031	ND (<LD)
22-ago-17	0.432	2.239	0.047	ND (<LD)	20-nov-17	0.198	1.074	0.028	ND (<LD)
28-ago-17	0.155	0.799	0.018(<LD)	ND (<LD)	26-nov-17	0.173	0.552	0.007(<LD)	ND (<LD)
03-sep-17	0.297	1.453	0.019 (<LD)	ND (<LD)	02-dic-17	0.183	1.241	0.03	ND (<LD)
09-sep-17	0.252	1.184	0.03	ND (<LD)	02-dic-17*	0.185	1.229	0.03	ND (<LD)
09-sep-17*	0.247	1.19	0.026	ND (<LD)	08-dic-17	0.083	0.486	0.003 (<LD)	ND (<LD)
15-sep-17	0.135	0.594	0.005 (<LD)	ND (<LD)	14-dic-17	0.126	0.784	0.014 (<LD)	ND (<LD)
21-sep-17	0.074	0.28	ND (<LD)	ND (<LD)	20-dic-17	0.087	0.272	ND (<LD)	ND (<LD)
27-sep-17	0.148	0.886	0.032	ND (<LD)	26-dic-17	0.151	0.479	0.0127(<LD)	ND (<LD)

LD = Límite de Detección.

ND = No Detectable.

BIBLIOGRAFÍA

(ATSDR) Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2018). Resumen de Salud Pública Manganese. Recuperado de <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp.asp?id=102&tid=23>

(AMDA) Alianza Mundial de Derecho Ambiental. (2010). Guía para la Evaluación de Proyectos Mineros. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Alloway, B. J., & Ayres, D. C. (1993). *Chemical Principles of Environmental Pollution*. (2da ed.). Springer.

Botello, A. V., Rendón-von Osten, J., Gold-Bouchot, G., & Agraz-Hernández, C. (2005). *Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias*. Univ. Autón. de Campeche, Univ. Nal. Autón de México, Instituto Nacional de Ecología (3ra ed.). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3616.4962>

Canales-Rodríguez, M. A., Quintero-Núñez, M., Castro-Romero, T. G., & García-Cuento, R. O. (2014). Las partículas respirables PM10y su composición química en la zona Urbana y rural de Mexicali, Baja California en México. *Informacion Tecnologica*, 25(6), 13–22. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000600003>

(CEDES) Comisión de Ecología y Desarrollo Sustentable. (2017). Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de Sonora 2017-2026. *ProAire*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/310199/23_ProAire_Sonora.pdf

(COESPO) Consejo Estatal de Poblacion. (2015). *Indicadores Sociales y Economicos 2015*. Cananea. Recuperado de <http://www.coespo.sonora.gob.mx/documentos/municipio/2015Cananea.pdf>

Csavina, J., Field, J., Taylor, M. P., Gao, S., Landázuri, A., Betterton, E. A., & Sáez, A. E. (2012). A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations. *Science of the Total Environment*, 433, 58–73. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.013>

(DOF) Diario Oficial de la Federación. (1993). Norma Oficial Mexicana que establece los métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición. Recuperado de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-035-SEMARNAT-1993.pdf>.

(DOF) Diario Oficial de la Federación. (1994). Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al plomo (Pb). *NOM-026-SSA1-1993*.

(DOF) Diario Oficial de la Federación. (2001). *NMX-AA-051-SCFI-2001*.

(DOF) Diario Oficial de la Federación. (2012). Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire. *NOM-156-SEMARNAT-2012*.

(DOF) Diario Oficial de la Federación. (2014). Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación. Recuperado de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014&print=true

(EPA) Environmental Protection Agency. (1992). Title 40, Protection of Environment. Recuperado de <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2008-11-12/pdf/E8-25654.pdf>

(EPA) Environmental Protection Agency. (1998). Manual de Aseguramiento de Calidad para Sistemas de Medición de Contaminantes del Aire. *Environmental Protection Agency*.

(EPA) Environmental Protection Agency. (1999). Sampling of Ambient Air For Total Suspended Particulates Matter y PM10; Using High Volume (HV) Sampler. *Center for Environmental Research Information Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency*.

(EPA) Environmental Protection Agency. (2018). Mapa Interactivo de Calidad del Aire. Recuperado de <https://www.epa.gov/outdoor-air-quality-data/interactive-map-air-quality-monitors>

Ferrís Tortajada, J., García Castell, J., López Andreu, J. A., García Domínguez, F., Ortega García, J. A., Berbel Tornero, O., ... Cánovas Conesa, A. (2001). Enfermedades asociadas a la polución atmosférica por combustibles fósiles. Aspectos pediátricos. *Revista Espanola de Pediatría*, 57(339), 213–225. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.52.1.184>

(FvMAA) Fiscalidad y Medio Ambiente en Argentina. (2015). Impacto de la Actividad Minera. Recuperado de https://www.fcecon.unr.edu.ar/web-nueva/sites/default/files/u16/Decimocuartas/ameriso_y_otros_fiscalidad_y_medio_ambiente_en_argentina.pdf

González-Santiago, O., Badillo-Castañeda, C. T., Kahl, J. D. W., Ramírez-Lara, E., & Balderas-Renteria, I. (2011). Temporal Analysis of PM10 in Metropolitan Monterrey, México. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 61(5), 573–579. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.61.5.573>

Greenpeace. (2018). El Aire que Respiro: El Estado la Calidad del Aire, 54. Recuperado de http://m.greenpeace.org/mexico/Global/mexico/sitio/2018/reportes/Aire_que_respiro_ok_EMR.pdf

(INEGI) Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1997). Cuaderno estadístico municipal: Cananea. *Anuarios Estadísticos de los Estados.*, 11.

(INSHT) Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (2015). *Enfermedades profesionales de naturaleza respiratoria Cáncer de pulmón. Directrices Para La Decisión Clínica De Enfermedades Profesionales.* España. Recuperado de [http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FICHAS DE PUBLICACIONES/EN CATALOGO/MEDICINA Y ENFERMERIA DEL TRABAJO/2014 2012 Directrices para la toma de decisiones/2014/DDC RES-04.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FICHAS_DE_PUBLICACIONES/EN_CATALOGO/MEDICINA_Y_ENFERMERIA_DEL_TRABAJO/2014_2012_Directrices_para_la_toma_de_decisiones/2014/DDC_RES-04.pdf)

(INAFED) Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. (2004). Enciclopedia de Los Municipios y Delegaciones de México. Estado de Sonora. Recuperado de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM26sonora/municipios/26019a.html>

Jimenez, B. E. (2010). *La contaminación ambiental en Mexico: Causas, efectos y tecnología apropiada.* (Limusa, Ed.) (1a ed.).

Lenntech. (2018). Efectos del Hierro sobre la salud. Recuperado de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/fe.htm>

Mejía, J., Carrizales, L., & Rodríguez, V. (1999, abril). Un método para la

evaluación de riesgos para la salud en zonas mineras. *Salud Pública de México*.
<https://doi.org/1606-7916>.

Middleton, N., Goudie, A., & Wells, G. (1986). *Aeolian geomorphology*. Boston: Allen and Unwin.

Miller, J. C., & Miller, J. N. (1993). *Estadística y quimiometría para Química Analítica*. (PEARSON EDUCACION, Ed.) (4ta ed.).

Minguillón, M. C., Campos, A. A., Cárdenas, B., Blanco, S., Molina, L. T., & Querol, X. (2014). Mass concentration, composition and sources of fine and coarse particulate matter in Tijuana, Mexico, during Cal-Mex campaign. *Atmospheric Environment*, 88, 320–329.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.09.032>

Mongay-Fernández, C. (2011). *Quimiometría*. (U. DE VALENCIA, Ed.).

Morales-García, S. S., Rodríguez-Espinosa, P. F., Jonathan, M. P., Navarrete-López, M., Herrera-García, M. A., & Muñoz-Sevilla, N. P. (2014). Characterization of As and trace metals embedded in PM10 particles in Puebla City, México. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186(1), 55–67.
<https://doi.org/10.1007/s10661-013-3355-4>

(OME) Ontario Ministry of Environment. (2012). Ontario's Ambient Air Quality Criteria. *Standards Development Branch: Ontario Ministry of the Environment*, 1–15. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

(OMS) Organización Mundial de la Salud. (2018). Calidad del aire y salud. Partículas (PM). Recuperado de [http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Oyarzún, G. (2010). Contaminación aérea y sus efectos en la salud. *Revista chilena de enfermedades respiratorias*, 26(1), 16–25. <https://doi.org/10.4067/S0717-73482010000100004>

Pelletier, J. D. (2006). Sensitivity of playa windblown-dust emissions to climatic and anthropogenic change. *Journal of Arid Environments*, 66, 62–75. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.10.010>

Pérez-Vidal, H., Lunagómez-Rocha, M., & Acosta-Pérez, L. (2010). Análisis de partículas suspendidas totales (PST) y partículas fracción respirable (PM10), en Cunduacán, Tabasco. *Universidad y Ciencia*, 26(2), 151–162.

Perez, F., & Hernandez, L. (2006). Determinación De Metales Pesados En Partículas Respirables E Identificación De Fuentes De Emisión, a Partir De Un Muestreo Atmosférico En La Localidad De Puente Aranda En La Ciudad De Bogotá. Recuperado de <http://www.myendnoteweb.com/EndNoteWeb.html?func=downloadInstallers&cat=download&>

Raabe, O. G. (1999). Respiratory exposure to air pollutants. *Air pollutants and the respiratory tract*.

Rodríguez Heredia, D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados Occupational poisoning due to heavy metals. *Medisan*, 21(12), 3372. Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/san/v21n12/san122112.pdf>

Rojano, R. E., Angulo, L. C., & Restrepo, G. (2013). Niveles de Partículas Suspendidas Totales (PST), PM10 y PM2.5 y su Relación en Lugares Públicos de la Ciudad Riohacha, Caribe Colombiano. *Información Tecnológica*, 24(2), 37–

46. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000200006>

Ruíz. (2010). Los metales pesados. *MoleQla: Revista de Química de la Universidad Pablo de Olavide*.

Salini Calderón, G. A., & Medina Mitma, E. J. (2017). Estudio sobre la dinámica temporal de material particulado PM10 emitido en Cochabamba, Bolivia. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(3), 437–448. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.03.07>

Sanin, L., Gonzalez, T., Romieu, I., & Hernandez, M. (1998). Acumulación de plomo en hueso y sus efectos en la Salud Pública de México. Recuperado de www.redalyc.org/articulo.oa?id=10640409

(SEES) Secretaría de Economía del Estado de Sonora. (2015). Sonora en la Minería. Recuperado de <http://www.economiasonora.gob.mx/portal/minero>

(SEDEMA) Secretaría del Medio Ambiente. (2017). Calidad del aire en la Ciudad de México: Informe 2016. *Secretaría del Medio Ambiente*.

(SEMARNAT) Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). *Calidad del aire: una práctica de vida. Cuadernos De Divulgación Ambiental*. Recuperado de <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001593.pdf>.

(SGM) Servicio Geológico Mexicano. (2014). Panorama Minero del Estado de Sonora. Recuperado de <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/SONORA.pdf>

(SMN) Servicio Meteorológico Nacional. (2016). Parámetros climáticos

promedio de Heroica Cananea, Sonora (1981-2010). Recuperado de <https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/mapas-de-climatologia-1981-2010>

Stockton, P. H., & Gillette, D. A. (1990). Field measurement of the sheltering effect of vegetation on erodible land surfaces. *Land Degradation & Development*, 2(2), 77–85. <https://doi.org/10.1002/ldr.3400020202>

Strauss, W., & J Mainwaring, S. (1990). Contaminación del aire : causas, efectos y soluciones / W. Strauss, S. J. Mainwaring. *SERBIULA (sistema Librum 2.0)*.

Tegen, I., & Fung, I. (1995). Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modification. *Journal of Geophysical Research*, 100(D9), 18707. <https://doi.org/10.1029/95JD02051>

Toledo, V. E., Almeida, P. B., Quiterio, S. L., Arbilla, G., Moreira, A., Escaleira, V., & Moreira, J. C. (2008). Evaluation of levels, sources and distribution of toxic elements in PM10 in a suburban industrial region, Rio de Janeiro, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 139(1–3), 49–59. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9815-y>

(UNDP) United Development Programme. (1997). Aridity Zones and Dryland Populations: An Assessment of Population Levels In, the World's Drylands. United Development Program, Office to Combat Desertification and Drought, New York, NY USA.

Universidad de Oviedo. (1998). Modelos de difusión atmosférica, from. Recuperado de <http://www6.uniovi.es/gma/fuentes.htm>

Valdivia, M. M. (2005). Intoxicación por plomo. *Sociedad Peruana de Medicina Interna*, 18(1), 27.

Wang, X., Bi, X., Sheng, G., & Fu, J. (2006). Chemical composition and sources of PM10 and PM2.5 aerosols in Guangzhou, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 119(1–3), 425–439. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-9034-3>

Wark, K., & Warner., C. F. (2000). *Contaminación del aire. Origen y control.* (Limus, Ed.) (9a ed.). Limusa.

Zuk, T., R. (2007). *Tercer almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en nueve ciudades mexicanas* (1a ed.).