



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

**CALIDAD DEL AIRE CON RESPECTO A PM_{2.5},
METALES Y METALOIDES, EN LA CIUDAD DE
CANANEA, SONORA, MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PRESENTA:

I.Q. MAGDIEL IRAÍS QUINTANA ANGUAMEA

DIRECTOR: DR. AGUSTÍN GÓMEZ ÁLVAREZ

Hermosillo, Sonora

Septiembre, 2019

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

UNIVERSIDAD DE SONORA

APROBACIÓN DEL JURADO

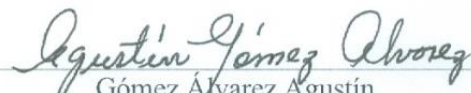
de la tesis presentada por:

Magdiel Iraís Quintana Anguamea

Esta tesis ha sido revisada por cada uno de los miembros del Jurado y por mayoría de votos la han encontrado satisfactoria.

06/09/2019

Fecha


Gómez Álvarez Agustín
Presidente

06/09/2019

Fecha


Monge Amaya Onofre
Secretario

06/09/2019

Fecha


Encinas Soto Karen Krizzan
Vocal

06/09/2019

Fecha


Cruz Campas Martín Eusebio
Sinodal Externo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ingeniería

Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química

AUTORIZACION DEL EXAMEN DE GRADO

10 Septiembre de 2019.

por la presente se hace constar que la estudiante: **Magdiel Irais Quintana Anguamea**, ha cumplido satisfactoriamente con los requisitos académicos correspondientes para la realización del Examen de grado del programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería.

Abraham Rogelio Martin Garcia
DR. ABRAHAM ROGELIO MARTIN GARCÍA

COORDINADOR

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

RESUMEN

En la presente investigación se evaluó la calidad del aire para la ciudad de Cananea, Sonora, México, respecto a material particulado ($PM_{2.5}$), metales (Pb, Cd, Cu) y metaloides (As, Si) para el periodo anual 2018. La localización de la estación de muestreo corresponde a los sitios considerados en la red de monitoreo de calidad del aire del Estado de Sonora. Para el análisis de $PM_{2.5}$ se utilizó el método de alto volumen (Hi-Vol) establecido en la Norma NOM-035-ECOL-1993 (DOF, 1993). La metodología para la determinación de metales es la establecida bajo el procedimiento para la determinación de plomo en partículas suspendidas, recomendada por la Agencia Protección Ambiental (EPA, 1992, Método CFR 40), utilizando la técnica de Espectroscopia de Absorción Atómica. Para evaluar la calidad del aire respecto de $PM_{2.5}$, se utilizó la Norma Mexicana NOM-025-SSA1-1993; así mismo se determinó el porcentaje de días con buena, regular y mala calidad del aire según lo establecido por SEMARNAT (2014). Para evaluar la calidad del aire respecto a metales pesados se utilizaron los siguientes criterios: Pb $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (CPCB, 2009), Cd, $0.005 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO, 2005), Cu $0.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (EPA, 2010), As $0.006 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (CPCB, 2009), y Si $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ISO, 1995).

Los resultados obtenidos para $PM_{2.5}$ no rebasaron el máximo permisible y promedio anual establecido por la NOM-025-SSA1-1993. La distribución de días con buena, regular y mala calidad del aire fue de 96.7% de días con buena calidad del aire y 3.3% con regular calidad del aire. Se identificó que las concentraciones detectadas de Cu, Pb, As y Si se encontraron muy por abajo de los límites de comparación. Se identificaron correlaciones significativas de 0.53 entre Cobre-Silicio (0.53). Por otra parte, la prueba estadística de van der Waerden ($p < 0.05$) mostró variabilidad significativa para Cu y Si, donde la prueba a posteriori señaló que para el Cu las estaciones otoño e invierno fueron estadísticamente diferentes entre sí, y para Si las estaciones de primavera e invierno mostraron diferencias significativas con respecto a verano y otoño. En lo que respecta a $PM_{2.5}$, Cd, Pb y As la prueba VW ($p < 0.05$) no mostró diferencias significativas entre las 4 estaciones del año.

En base a lo anterior, la ciudad de Cananea, Sonora, presenta concentraciones de $PM_{2.5}$, metales y metaloides muy por abajo de los estándares internacionales en comparación con otras ciudades de México y el mundo. Por lo tanto, se acepta la hipótesis de trabajo planteada en la presente investigación, por lo que se considera la Calidad del Aire como buena para la ciudad del Cananea, Sonora, durante el ciclo anual (2018).

ABSTRACT

In this research, air quality was evaluated for the city of Cananea, Sonora, México, regarding particulate material (PM_{2.5}), metals (Pb, Cd, Cu) and metalloids (As, Si) for the annual period 2018. The location of the sampling station corresponds to the sites considered in the Air Quality Monitoring Network of the State of Sonora. For the PM_{2.5} analysis, the high volume (Hi-Vol) method established in standard NOM-035-ECOL-1993 (DOF, 1993) was used. The methodology for the determination of metals is that established under the procedure for the determination of lead in suspended particles, recommended by the Environmental Protection Agency (EPA, 1992, Method CFR 40), using the Atomic Absorption Spectroscopy technique. To evaluate the air quality with respect to PM_{2.5}, Mexican Standard NOM-025-SSA1-1993 was used; Likewise, the percentage of days with good, regular and poor air quality was determined as established by SEMARNAT (2014). The following criteria were used to evaluate air quality with respect to heavy metals: Pb 0.5 µg / m³ (CPCB, 2009), Cd, 0.005 µg / m³ (WHO, 2005), Cu 0.29 µg / m³ (EPA, 2010), As 0.006 µg / m³ (CPCB, 2009), and Si 3 µg / m³ (ISO, 1995).

The results obtained for PM_{2.5} did not exceed the maximum allowable and annual average established by NOM-025-SSA1-1993. The distribution of days with good, regular and poor air quality was 96.7% of days with good air quality and 3.3% with regular air quality. It was identified that the detected concentrations of Cu, Pb, As and Si were found well below the comparison limits. Significant correlations of 0.53 were identified between Copper and Silicon ($r=0.53$). On the other hand, the Van der Waerden statistical test ($p < 0.05$) showed significant variability for Cu and Si, where the a posteriori test indicated that for the Cu the autumn and winter seasons were statistically different from each other, and for Si the seasons spring and winter showed significant differences with respect to summer and autumn. Regarding PM_{2.5}, Cd, Pb and As, the VW test ($p < 0.05$) showed no significant differences between the 4 seasons of the year. Based on the above, the city of Cananea, Sonora, has concentrations of PM_{2.5}, metals and metalloids well below international standards compared to other cities in México and the world. Therefore, the working hypothesis proposed in this research is accepted, so Air Quality is considered good for the city of Cananea, Sonora, during the annual cycle (2018).

CONTENIDO

RESUMEN.....	IV
ABSTRACT	VI
LISTA DE TABLAS	XI
LISTA DE FIGURAS	XII
AGRADECIMIENTOS	XIII
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN.....	1
CAPITULO 2	3
OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo General	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
CAPÍTULO 3	4
HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN	4
3.1 Hipótesis de Trabajo:.....	4
CAPÍTULO 4	5
ANTECEDENTES.....	5
4.1 Calidad del Aire	5
4.2 Fuentes de contaminación del aire	6
4.3 Tipos de contaminantes del aire	7
4.3.1 Material Particulado (PM _{2.5})	7
4.3.2 Metales Potencialmente Tóxicos (MPT).....	9
4.4 Comportamiento del Material Particulado PM _{2.5} , Metales y Metaloides con respecto a parámetros climatológicos (temperatura, precipitación, humedad relativa, velocidad del aire).	10
4.5 Efectos a la Salud por la Contaminación del Aire	11

4.5.1 Material Particulado (PM _{2.5})	11
4.5.2 Metales (Cd, Cu, Pb) y Metaloides (As, Si)	12
4.6 Valores Máximos Permisibles de Calidad del Aire	13
4.6.1 Valores máximos permisibles para material particulado (PM _{2.5})	13
4.6.2 Valores máximos permisibles para metales (Cd, Cu, Pb) y metaloides (As, Si) en PM _{2.5} ...	14
4.7 Estudios Realizados de Calidad del Aire en el Estado de Sonora y en Algunos Estados de México y el mundo	15
CAPÍTULO 5	17
ÁREA DE ESTUDIO	17
5.1 Localización del Área de Estudio	17
5.2 Cananea, Sonora, México	17
5.2.1 Climatología	19
5.2.2 Flora y Fauna	19
5.2.3 Características del Suelo	19
5.2.4 Población	20
CAPÍTULO 6	21
MATERIALES Y MÉTODOS	21
6.1 Frecuencia y procedimiento de Colecta de Muestras de Aire	21
6.2 Operación de la estación de monitoreo	21
6.3 Almacenamiento y Transporte de las Muestras (Filtros).....	24
6.4 Análisis de Laboratorio	24
6.4.1 Preparación de los filtros (acondicionamiento) para la colecta de las muestras de aire.	24
6.4.2 Determinaciones analíticas: material particulado PM _{2.5} , Metales (Cd, Cu, Pb) y Metaloides (As, Si).....	25
6.5 Control de Calidad en el Muestreo y Análisis de las Muestras de Filtros.....	27
6.5.1 Preparación y limpieza de los equipos de muestreo y material de cristalería	28
6.5.2 Blancos de digestión	28
6.5.3 Calibración y Estandarización de los Equipos de Muestreo.....	29
6.6 Precisión.....	30
6.7 Exactitud.....	31
6.8 Límite de Detección del Instrumento (L.D.)	32

6.9 Normas de Calidad y/o Criterios de Calidad del Aire, Utilizados en la Presente Investigación	33
6.10 Criterio de cobertura de datos	33
6.11 Estadística descriptiva	34
6.12 Análisis de Varianza (Prueba No paramétrico de van der Waerden)	34
6.13 Análisis de correlación entre las variables del presente estudio (PM_{2.5}, metales y metaloides)	36
6.14 Rosa de los vientos	37
CAPÍTULO 7	38
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
7.1 Comportamiento general del material particulado PM_{2.5} comparado con la velocidad del viento durante ciclo anual 2018.	38
7.1.1 Concentración Máxima, Mínima y Promedio Anual	39
7.1.2 Comportamiento trimestral del Material Particulado PM _{2.5}	40
7.1.3 Comportamiento del clima	45
7.1.4 Distribución de días con calidad del aire buena, regular y mala con respecto de PM _{2.5}	47
7.2 Metales (Cd, Cu, Pb) y Metaloides (As, Si)	49
7.2.1 Cadmio.....	49
7.2.2 Cobre	50
7.2.3 Plomo	51
7.2.4 Arsénico	52
7.2.5 Silicio.....	53
7.3 Resultados del análisis estadístico en relación a la asociación de las concentraciones totales de PM _{2.5} , Metales y Metaloides, y parámetros climatológicos (precipitación, temperatura, humedad relativa).	56
7.4 Comparativo del promedio anual de PM _{2.5} en la ciudad de Cananea con respecto a otras regiones del país y del mundo.	57
7.5 Comparativo de Metales y Metaloides en la ciudad de Cananea con respecto a otras ciudades del país y del mundo.....	59
CAPÍTULO 8	61
CONCLUSIONES	61
CAPÍTULO 9	63
RECOMENDACIONES	63

CAPÍTULO 10	64
BIBLIOGRAFÍA.....	64
CAPÍTULO 11	71
ANEXOS	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales fuentes de los contaminantes (Ubilla y Yohannessen, 2017).	8
Tabla 2. Componentes de las partículas suspendidas (SEMARNAT, 2011).	9
Tabla 3. Estudios realizados sobre calidad del aire en Sonora y en algunos estados de México y el mundo.	16
Tabla 4. Resultados del control de calidad	28
Tabla 5. Evaluación del criterio de compleción o cobertura para muestreos de PM _{2.5} en Cananea, Sonora, durante el año 2018.	34
Tabla 6. Días con buena, regular y mala calidad del aire respecto a PM _{2.5} en la ciudad de Cananea, Sonora, México durante el año 2018.	48
Tabla 7. Variabilidad temporal de PM _{2.5} , metales y metaloides con respecto a las estaciones del año	55
Tabla 8. Promedio anual de PM _{2.5} , reportado para diferentes ciudades del país y del mundo (WHO, 2016).	58
Tabla 9. Concentraciones promedio y máxima de metales (µg/m ³) detectadas en diferentes ciudades del mundo.	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio	18
Figura 2. Ubicación de la Estación de Monitoreo (TEC) en la Ciudad de Cananea, Sonora.	22
Figura 3. Muestreador de alto volumen (HI-VOL).	23
Figura 4. Comparación de la concentración de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) con el valor máximo permisible ($45 \mu g/m^3$) para 24 horas y la velocidad del viento durante el ciclo anual 2018.....	39
Figura 5. Valores máximo, promedio y mínimo de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) en la ciudad de Cananea, Sonora, México, durante el año 2018.	40
Figura 6. Comportamiento de la concentración de PM_{25} ($\mu g/m^3$) durante el Trimestre 1.	41
Figura 7. Comportamiento de la concentración de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) durante el Trimestre 2.....	42
Figura 8. Comportamiento de la concentración de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) durante el Trimestre 3.	43
Figura 9. Comportamiento de la concentración de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) durante el Trimestre 4.....	44
Figura 10. Direcciones de procedencia de los vientos en los 4 trimestres del año (2018).	46
Figura 11. Porcentaje de días con buena, regular y mala calidad del aire respecto a $PM_{2.5}$ en la ciudad de Cananea, Sonora, México durante el año 2018.....	48
Figura 12. Días de Buena, Regular y Mala Calidad del Aire por Trimestre	49
Figura 13. Distribución de la concentración de Cd ($\mu g/m^3$) en aire ambiente en la ciudad de Cananea, Sonora, durante el año 2018	50
Figura 14. Distribución de la concentración de Cu ($\mu g/m^3$) en aire ambiente en la ciudad de Cananea, Sonora, durante el año 201	51
Figura 15. Distribución de la concentración de Pb ($\mu g/m^3$) en aire ambiente en la ciudad de Cananea, Sonora, durante el año 2018.	52
Figura 16. Distribución de la concentración de As ($\mu g/m^3$) en aire ambiente en la ciudad de Cananea, Sonora, durante el año 2018.	53
Figura 17. Distribución de concentración de Si ($\mu g/m^3$) en aire ambiente en la ciudad de Cananea, Sonora durante el año 2018.	54

AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente a mi familia por el apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de mi vida.

A mis compañeros y amigos por los momentos inolvidables que hemos compartido.

Gracias a la Universidad de Sonora en su División de Ingeniería, al Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, al Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química, al Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por facilitarme las herramientas necesarias para el desarrollo de mi proyecto.

Un especial agradecimiento a mi director de tesis el Dr. Agustín Gómez Álvarez al igual que a mis sinodales: Dr. Martín Eusebio Cruz Campas, Dra. Onofre Monge Amaya y Dra. Kareen Krizzan Encinas Soto por la atención y ayuda brindada en la realización de mi trabajo de investigación. De igual manera agradezco al M.C. Arturo I. Villalba Atondo y la Q.B. Ana María Pérez Villalba por su colaboración incondicional en el transcurso de este proyecto.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Para la Organización Mundial de la Salud, el aire limpio es un requisito fundamental para el bienestar de los seres humanos (OMS, 2006); sin embargo, actualmente la contaminación del aire aparte de ser uno de los principales problemas ambientales, es particularmente un fenómeno que aqueja a la salud de las poblaciones en el mundo (INECC, 2016). Según Kampa-Castanas (2008), se entiende por contaminante del aire como cualquier sustancia que implique daño tanto para las personas como para la naturaleza en general, dichos contaminantes deben sus orígenes a actividades naturales y/o antropogénicas. Dentro de estos se puede encontrar el material particulado respirable, que tal y como lo describen Garrido-Camargo (2012), es una mezcla de compuestos orgánicos e inorgánicos de distinta composición química, que puede estar constituidos tanto por metales, así como por compuestos de nitrógeno, azufre y carbono. La NOM-025-SSA1-2014 establece que dichas partículas se clasifican de acuerdo a su diámetro aerodinámico, ya que el tamaño es un parámetro importante para la caracterización de su comportamiento en la atmósfera y para determinar la capacidad de penetración y retención en múltiples regiones de las vías respiratorias, como es el caso de las partículas menores o iguales a 2.5 micras ($PM_{2.5}$) que se depositan especialmente en la región traqueobronquial. Las partículas antes mencionadas juegan un papel importante en relación a los daños a la salud y varían de un sitio a otro, dependiendo de la fuente de emisión, así como de las condiciones geográficas y meteorológicas (DOF, 2014).

Como se mencionó anteriormente el material particulado debe sus orígenes a fuentes naturales y antropogénicas, siendo las naturales las que mayor aportación tienen a la atmósfera; Sin embargo, en los últimos años se ha centrado especial atención en las partículas de procedencia antrópica derivadas de los procesos de combustión de las industrias, el tráfico, la minería, etc. Específicamente el material particulado emitido por los

complejos mineros son partículas de tamaño fino ($PM_{2.5}$) y con altas concentraciones de metales que pueden influenciar en la calidad del aire de las zonas urbanas (De La Rosa, 2008).

Está bien documentado que la industria minera contribuye significativamente con altos niveles de contaminantes hacia el Medio Ambiente (agua, Aire, Suelo). La explotación minera ocasiona otros problemas ambientales como la pérdida de cobertura vegetal, la creación de estructuras poco consolidadas que son susceptibles a la erosión eólica e hídrica, la introducción al ambiente de sustancias tóxicas en los procesos de beneficio y la generación de acidez y metales pesados (Prol et al., 2004)

En el estado de Sonora, México, existe el complejo minero de cobre más importante a nivel nacional e internacional. Asimismo, se han detectado problemas de contaminación, derivado de la actividad minera por la presencia de partículas (orgánicas e inorgánicas) afectando a la población de la ciudad de Cananea y áreas aledañas, y por ende a la vegetación y fauna adyacente (Toscana-Aparicio, 2017).

El presente estudio aportará información actualizada, en lo referente a partículas $PM_{2.5}$, metales y metaloides en la ciudad de Cananea, Sonora, lo cual permitirá a las instancias oficiales conocer la calidad de aire y la posible asociación con la salud de la población y el Medio Ambiente, con la finalidad de establecer programas de diseño de estrategias y políticas de protección.

CAPITULO 2

OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Evaluar la calidad de aire ambiente con respecto a material particulado ($PM_{2.5}$), metales (Cd, Cu, Pb) y metaloides (As, Si), en la ciudad de Cananea, Sonora, México; y su comportamiento temporal durante un ciclo anual (2018).

2.2 Objetivos Específicos

1. Estimar las concentraciones de los parámetros ($PM_{2.5}$, metales y metaloides) en muestras de aire (filtros), recolectados en la región de Cananea, Sonora, en el período enero-diciembre 2018.
2. Estudiar el comportamiento temporal de los parámetros ($PM_{2.5}$, metales y metaloides), durante el periodo enero-diciembre 2018, a través de un análisis estadístico.
3. Estimar la potencial asociación del material particulado ($PM_{2.5}$) con respecto a metales, metaloides, y parámetros climatológicos (precipitación, temperatura, humedad relativa).
4. Evaluar la calidad de aire con respecto a material particulado ($PM_{2.5}$), metales y metaloides, en la ciudad de Cananea, Sonora, en base a la normatividad vigente.
5. Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos de $PM_{2.5}$, metales y metaloides, a nivel estatal, nacional e internacional.

CAPÍTULO 3

HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

3.1 Hipótesis de Trabajo:

La concentración de PM_{2.5}, metales (Cd, Cu, Pb) y metaloides (As, Si) en el aire ambiente de Cananea, Sonora, no rebasan los máximos permisibles o estándares, dando como resultado una buena calidad del aire durante un ciclo anual (2018).

CAPÍTULO 4

ANTECEDENTES

4.1 Calidad del Aire

La calidad del aire que nos rodea es resultado de una combinación de factores, que producen cambios en su composición y que puede variar de un momento a otro. Por ejemplo, si se vive en una ciudad es común identificar la contaminación del aire y asociarla a la actividad industrial, comercial y al uso de vehículos; la poca visibilidad de lugares lejanos es un indicador del deterioro de la calidad del aire que respiramos (SEMARNAT, 2013).

La contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud tanto en las ciudades como en las zonas rurales; actualmente se estima que la contaminación ambiental del aire es la causa de 4,2 millones de muertes prematuras en todo el mundo por año; esta mortalidad se debe a la exposición a partículas pequeñas de 2,5 micrones o menos de diámetro ($PM_{2.5}$), que causan enfermedades cardiovasculares y respiratorias, y cáncer. Por lo tanto, es fundamental conocer cuáles son las condiciones de la calidad del aire que se respira, esto se realiza a través de mediciones cuantitativas de los contaminantes con respecto al espacio y tiempo, posteriormente estas mediciones se comparan con las normas nacionales e internacionales y finalmente se puede conocer si las condiciones de la calidad del aire son satisfactorias (OMS, 2018).

La Organización Mundial de la Salud establece que la exposición a los contaminantes atmosféricos está en gran medida fuera del control personal y requiere medidas de las autoridades públicas a nivel local, nacional e internacional (OMS, 2018). Las Guías de la Calidad del Aire de la OMS constituyen un análisis consensuado y actualizado sobre los efectos de la contaminación en la salud, que recomiendan los parámetros de calidad del aire para reducir de modo significativo los riesgos a la salud. Derivado de esto, las

autoridades nacionales elaboran las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) por conducto de la Secretaría de Salud, las cuales fijan los valores máximos permisibles para aquellos contaminantes que representan un riesgo comprobado en la salud humana. Los límites se establecen utilizando como referencia a los grupos más sensibles de la población, como niños, adultos mayores y personas con padecimientos respiratorios y cardiovasculares (SEMARNAT, 2013).

4.2 Fuentes de contaminación del aire

Los contaminantes pueden ser de origen natural o antropogénico y su proporción en el aire depende de la fuente que los emita en una región determinada. Los contaminantes de origen natural son aquellos que provienen de las erupciones volcánicas, incendios forestales, erosión del suelo, polen, restos de animales o plantas, entre otros. Por otra parte, los contaminantes de origen antropogénico son aquellos que se generan a partir de la actividad humana como la quema de combustibles fósiles, quemas de campos agrícolas, procesos industriales, actividad minero-metalúrgica, etc. (Sánchez et al., 2014).

Las fuentes de emisiones contaminantes también pueden clasificarse de acuerdo a su movilidad en cuatro categorías principales: Fuentes puntuales o fijas, Fuentes de área, Fuentes móviles y Fuentes naturales. Las fuentes fijas de emisiones incluyen las plantas generadoras de energía termoeléctrica, los procesos industriales y agroindustriales y la quema e incineración de desechos. Las fuentes de área son en su mayoría fuentes fijas, pero que son muy pequeñas en términos de la cantidad de emisiones que producen, y son muy numerosas. Su naturaleza es variada, pero las más importantes son básicamente la quema de combustibles para cocinas, calentadores de agua, calefactores, maquinaria de construcción y maquinaria agrícola. Las fuentes móviles son básicamente los vehículos automotores que circulan por las carreteras públicas, y por último las fuentes naturales son aquellas emitidas por los fenómenos naturales como, la vida animal y vegetal como el polen, las erupciones volcánicas, tolvánicas, etc. (SEMARNAT, 2005).

Generalmente la mayoría de estos contaminantes afectan negativamente la calidad del aire y traen como consecuencia distintas repercusiones al medio ambiente y a la salud de las personas.

4.3 Tipos de contaminantes del aire

Los contaminantes pueden ser clasificados como primarios o secundarios. Por lo general, los contaminantes primarios se producen directamente a partir de un proceso, como la ceniza de una erupción volcánica, el gas de monóxido de carbono de un escape de un vehículo motorizado o dióxido de azufre liberado de las fábricas. Los contaminantes secundarios no se emiten directamente, más bien se forman en el aire cuando los contaminantes primarios reaccionan o interactúan. Un importante ejemplo de un contaminante secundario es el ozono a nivel del suelo, que es considerado como uno de los muchos contaminantes que componen el smog fotoquímico. Algunos contaminantes pueden ser tanto primarios como secundarios; es decir, ambos se emiten directamente y se forman a partir de otros contaminantes primarios mismos (Choudhary *et al.*, 2013). En la siguiente Tabla 1, se muestran algunos tipos de contaminantes y el origen de los mismos.

4.3.1 Material Particulado (PM_{2.5})

Se denomina material particulado a cualquier material, excepto agua no combinada, que existe en fase sólida o líquida suspendida en la atmósfera, su composición es diversa dependiendo de su origen, su diámetro aerodinámico varía generalmente entre 0.005 a 100 micrómetros (μm) (INE, 2007). El material particulado en el aire ambiente representa una mezcla compleja de sustancias orgánicas e inorgánicas (Tabla 2), las partículas menores de 10 micrómetros (PM₁₀) y las partículas menores de 2.5 micrómetros (PM_{2.5}) por ser las de mayor penetración al sistema respiratorio e impactan en la visibilidad atmosférica son consideradas las más dañinas (Jiménez, 2002).

Tabla 1. Principales fuentes de los contaminantes (Ubilla y Yohannessen, 2017).

Contaminante	Fuente
Material Particulado (MP)	MP grueso (entre 2.5 y 10 micras): polvo, tierra, materiales de la carretera, agricultura, minería, tormentas de viento o volcanes (incluyen sales marinas, polen, moho, esporas y otros materiales biológicos). MP fino (< 2.5 micras): procesos de combustión y procesos industriales.
Ozono (O ₃)	Se forma en la atmósfera por reacciones entre óxidos de nitrógeno (NO _x) y compuestos orgánicos volátiles (COVs) en presencia de calor y luz solar.
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	Combustión de alta temperatura (ej. empresas eléctricas, calderas industriales y vehículos).
Plomo (Pb)	Vehículos de motor y fuentes industriales. En países donde se prohíbe la gasolina con plomo las fuentes son: fundiciones de plomo, incineradoras de residuos y fábricas de baterías de plomo-ácido.
Monóxido de Carbono (CO)	Producto de la combustión incompleta del gas natural, carbón o madera y tráfico vehicular.
Dióxido de Azufre (SO ₂)	Quema de combustible (carbón con alto contenido de azufre y petróleo), empresas eléctricas, procesos industriales y la extracción de metales.

El estudio y la regulación ambiental de las partículas empezó centrándose en las partículas suspendidas totales (PST). Posteriormente, la atención se centró en las partículas con diámetros aerodinámicos menores de 10 μm y actualmente, en las partículas finas y ultrafinas, es decir, las menores de 2.5 μm . En los Estados Unidos de Norteamérica la regulación de las PST empezó en 1971, agregando normas para (PM₁₀) en 1987 y para (PM_{2.5}) en 1997. En México, la norma que regula los niveles de (PM₁₀) entró en vigor en 1994 y fue modificada en 2005, cuando se incluyeron las PM_{2.5} (DOF, 2005).

Tabla 2. Componentes de las partículas suspendidas (SEMARNAT, 2011).

Compuestos mayoritarios	Compuestos minoritarios
<ul style="list-style-type: none"> • Sulfatos (SO₄) • Nitratos (NO₃) • Amonio (NH₄) • Sodio y cloro (Na y Cl) • Carbón elemental • Carbón orgánico o Aerosol orgánico secundario • Componentes minerales o Fe₂O₃, Ca, Si y Al • Agua 	<ul style="list-style-type: none"> • Elementos traza: como plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg), níquel (Ni), cromo (Cr), zinc (Zn), magnesio (Mg), etc. • Compuestos orgánicos: hidrocarburos aromáticos, HAP, alifáticos, aldehídos, ácidos carboxílicos y cetonas, entre otros.

4.3.2 Metales Potencialmente Tóxicos (MPT)

Los metales y metaloides son elementos químicos que se caracterizan por ciertas propiedades químicas y físicas. Químicamente los metales son estructuras atómicas muy compactas con fuerzas de atracción muy fuertes que hacen difícil romperlos, mientras que físicamente suelen tener opacidad, pero pueden ser buenos reflectores de la luz o tener brillo, ser buenos conductores de la electricidad, buenos conductores térmicos, tener altos puntos de fusión y ebullición, y ser compactos al tiempo de ser dúctiles o maleables (Mercado-Calderón, 2017). Algunos metales son necesarios para los seres vivos, pero pueden llegar a ser tóxicos si rebasan ciertas concentraciones. Químicamente se entiende por potencialmente tóxico aquel cuya densidad es mayor a 5 g/cm³ como el Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, etc., al igual que el metaloide As (Jiménez, 2002).

Los metaloides o semimetales son elementos que se comportan como no metales, química y físicamente. Sin embargo, en su propiedad física más importante, la conductividad eléctrica, se parecen a los metales. Los metaloides tienden a ser semiconductores, pero conducen la electricidad en menor grado que los metales. Al igual que los metales, algunos no metales y metaloides, como Se y As, son potencialmente tóxicos, dependiendo de su concentración (Csuros y Csuros, 2002). Una forma de nombrar a este grupo es como “elementos tóxicos”, los cuales, de acuerdo a la lista de contaminantes prioritarios de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), incluyen a los siguientes elementos: arsénico, cromo, cobalto, níquel, cobre, zinc, plata, cadmio, mercurio, titanio,

selenio y plomo. Los metales se encuentran en forma natural en la corteza terrestre y se pueden convertir en contaminantes si su distribución en el ambiente se altera mediante actividades humanas. En general esto puede ocurrir durante la extracción minera, el refinamiento de productos mineros o por la liberación al ambiente de efluentes industriales y emisiones vehiculares (INECC, 2009).

Las fuentes de emisión más importantes para algunos metales como el cobre, son industrias metalúrgicas, procesos de refinado, centrales térmicas con combustión de carbones, suelos, incineradores municipales y otros procesos en lo que se emplean combustibles fósiles. Las principales fuentes a la atmósfera de cadmio se dan por la industria del zinc, ya que constituye un subproducto, el cadmiado de metales, la fabricación de colorantes, en la construcción de células fotovoltaicas, abonos fosfatados, etc. Estas son las fuentes posibles de estos contaminantes, tanto por sus chimeneas, como por emisiones fugitivas (Jiménez, 2002). Considerando criterios medioambientales de salud, la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2000a) publicó, en sus guías de calidad del aire, los valores guía para 35 contaminantes del aire, de los cuales, 16 son contaminantes orgánicos, 3 son contaminantes de aire en interiores, 4 son los contaminantes clásicos (NO_2 , O_3 , Partículas y SO_2) y 12 son contaminantes inorgánicos, entre ellos los siguientes metales: cadmio, cromo, plomo, manganeso, mercurio, níquel, platino y vanadio.

4.4 Comportamiento del Material Particulado $\text{PM}_{2.5}$, Metales y Metaloides con respecto a parámetros climatológicos (temperatura, precipitación, humedad relativa, velocidad del aire).

La concentración de los contaminantes en la atmósfera se afecta por variables meteorológicas como la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar, que controlan a su vez la velocidad con la que se realizan las reacciones químicas atmosféricas. Por otro lado, la dispersión de estos contaminantes es influenciada por la velocidad y dirección de los vientos, así como la estabilidad que predomina en la atmósfera (Ramos et al., 2010).

El estudio de estos factores en una determinada zona es de gran utilidad, ya que permite conocer su capacidad potencial para la dispersión y eliminación de los contaminantes.

4.5 Efectos a la Salud por la Contaminación del Aire

4.5.1 Material Particulado (PM_{2.5})

Las partículas tienen numerosos efectos, muchos de los cuales constituyen una seria contaminación atmosférica. El más obvio de éstos es la reducción y distorsión de la visibilidad. Estas partículas, proporcionan superficies activas donde pueden ocurrir reacciones químicas atmosféricas heterogéneas y constituyen sitios de nucleación para condensación de vapor de agua atmosférico, ejerciendo por ello una influencia significativa en el tiempo y los fenómenos de contaminación del aire (Manahan, 2007).

Las partículas atmosféricas inhaladas a través del tracto respiratorio pueden dañar la salud. Las partículas relativamente grandes, probablemente son retenidas en la cavidad nasal y en la faringe, mientras que las partículas más pequeñas alcanzan los pulmones, donde quedan retenidas o, si son todavía más pequeñas pasan a fluidos corporales. El sistema respiratorio posee mecanismos para expulsar las partículas inhaladas. En la región ciliada del sistema respiratorio, las partículas son llevadas hasta la entrada del tracto gastrointestinal por un flujo de mucosidad. El sistema respiratorio puede ser dañado directamente por la materia particulada que entra en el sistema sanguíneo linfático a través de los pulmones. Adicionalmente, el material particulado o los componentes solubles en él pueden transportarse a los órganos alejados de los pulmones y pueden tener un efecto perjudicial sobre otros órganos. Las partículas desalojadas del tracto respiratorio son llevadas en gran medida hacia el tracto gastrointestinal. Se ha encontrado una fuerte correlación entre los aumentos de la tasa de mortalidad diaria y los episodios agudos de contaminación atmosférica (Manahan, 2007).

Es importante señalar que las autoridades de Estados Unidos de Norteamérica y Europa establecieron, en un principio, regulaciones basadas en la medición de partículas suspendidas totales (PST), las cuales, son de un diámetro aerodinámico menor a 50 micrómetros medidas con un muestreador de alto volumen, pero conforme fueron conociéndose nuevos estudios en la materia, la normatividad sobre la calidad del aire se volvió más específica y requirió la medición de partículas suspendidas con diámetro aerodinámico menor a 10 micras (PM₁₀), y posteriormente de aquellas con diámetro menor a 2.5 micras (PM_{2.5}) (Manahan, 2007).

4.5.2 Metales (Cd, Cu, Pb) y Metaloides (As, Si)

En los países en desarrollo, se han detectado problemas muchos mayores por las emisiones tóxicas que en los países desarrollados. Un ejemplo es el uso de las gasolinas con plomo usadas en los primeros, las cuales contribuyen a la contaminación con plomo en áreas metropolitanas, y pueden causar daño severo y permanente al cerebro e inclusive la muerte. 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). A continuación, se describen los aspectos toxicológicos más relevantes de los metales y metaloides contemplados en el presente estudio.

Plomo. Los primeros síntomas que provoca son irascibilidad, desgano y fatiga, que comúnmente son menospreciados hasta que, con el tiempo existe dolor de cabeza, pérdida de 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 (WHO, 2018).

Cadmio. Este elemento se acumula principalmente en los riñones y tiene una vida media biológica prolongada de 10 a 35 años en los seres humanos. Los primeros síntomas que provoca son parecidos a los del reumatismo y los pacientes se ven limitados a permanecer en cama (Jiménez, 2002). En 1993, la International Agency for Research on Cancer (IARC) clasificó al cadmio y compuestos de cadmio en el grupo 1 de cancerígenos humanos (WHO, 2000b). Los compuestos del cadmio pueden ser formados en las chimeneas y emitidos al ambiente.

Cobre. Este metal es un irritante en el sistema respiratorio produciendo además irritación en la mucosa de la boca, ojos y nariz. Una alta inhalación de polvo de cobre puede causar perforación del septum nasal. La fiebre de humo de metales (fiebre, resfriados, mialgias, dolor de cabeza, malestar, garganta seca) puede resultar por la inhalación de humos de

operaciones de fundición de cobre. Sin embargo, este tipo de enfermedades no es muy común debido a las altas temperaturas necesarias para producir humos de cobre. Ni la IARC (International Agency of Research on Cancer) ni el Programa Toxicológico de Estados Unidos han listado al cobre o sus compuestos como cancerígeno (Barceloux, 1999).

Arsénico. Los síntomas inmediatos de intoxicación aguda por arsénico incluyen vómitos, dolor abdominal y diarrea. Seguidamente, aparecen otros efectos, como entumecimiento u hormigueo en las manos y los pies o calambres musculares y, en casos extremos, la muerte. Los primeros síntomas de la exposición prolongada a altos niveles de arsénico inorgánico (por ejemplo, a través del consumo de agua y alimentos contaminados) se observan generalmente en la piel e incluyen cambios de pigmentación, lesiones cutáneas y durezas y callosidades en las palmas de las manos y las plantas de los pies (hiperqueratosis). Estos efectos se producen tras una exposición mínima de aproximadamente cinco años y pueden ser precursores de cáncer de piel (WHO, 2018).

Silicio. Este elemento puede tener efectos crónicos en la respiración. El silicio cristalino (dióxido de silicio) es un potente peligro para la respiración, puede irritar la piel y los ojos por contacto. Su inhalación causa irritación de los pulmones y de la membrana mucosa. La irritación de los ojos provoca lagrimeo y enrojecimiento. El enrojecimiento, formación de costras y picores son características de la inflamación cutánea. El cáncer de pulmón está asociado con exposiciones a silicio cristalino (especialmente cuarzo y cristobalita) en lugares de trabajo. El silicio cristalino puede afectar el sistema inmunitario, resultando en infecciones micobacterianas (tuberculosas y no tuberculosas) o fúngicas, especialmente en trabajadores con silicosis. La exposición ocupacional al silicio cristalino respirable está asociada con bronquitis, enfermedad crónica de obstrucción pulmonar (COPD) y enfisema (www.lenntech.es/periodica/elementos/si.htm).

4.6 Valores Máximos Permisibles de Calidad del Aire

4.6.1 Valores máximos permisibles para material particulado (PM_{2.5})

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2005), ha establecido el límite de partículas en el aire ambiente, el cual es de 25 µg/m³ de PM_{2.5} en 24 horas y 10 µg/m³ de PM_{2.5} en 1 año.

En México, los máximos permisibles de calidad del aire para material particulado menor a 2.5 micras ($PM_{2.5}$) han sido publicados en la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014 (DOF, 2014), siendo dicho valor para $PM_{2.5}$ de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas en un período de un año; $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en una media aritmética anual.

4.6.2 Valores máximos permisibles para metales (Cd, Cu, Pb) y metaloides (As, Si) en $PM_{2.5}$

4.6.2.1 Cadmio: Para este metal no existe un referente de exposición permisible en aire ambiente en México; sin embargo, en este estudio se utilizó el criterio de la WHO (2000a), que establece un valor de $0.005 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual.

4.6.2.2 Cobre. En México no existe norma sobre calidad del aire para este metal. Para fines de establecer la calidad del aire basado en concentraciones detectadas de este elemento se tomaron en cuenta los criterios de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de Norteamérica (EPA, 2010), que fija un valor máximo permisible de cobre en aire de $0.290 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

4.6.2.3 Plomo. Para el caso de este metal se consideraron los estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiente para la India (CPCB, 2009), los cuales establecen un valor máximo permisible de plomo en $PM_{2.5}$ de $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio en 24 horas.

4.6.2.4 Silicio: Este metaloide no se encuentra regulado por la normatividad en México. La Organización Internacional de Normalización (ISO, 1995), propone un límite máximo permisible de $3 \text{g}/\text{m}^3$.

4.6.2.5 Arsénico: No existe normatividad mexicana correspondiente a este metal, por lo que se optó por tomar en consideración los estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiente para la India (CPCB, 2009) los cuales establecen un valor máximo permisible de $0.006 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio en 24 horas.

4.7 Estudios Realizados de Calidad del Aire en el Estado de Sonora y en Algunos Estados de México y el mundo.

En la Tabla 3, se presenta un resumen de los algunos estudios realizados sobre calidad del aire realizados en algunos estados de México y el mundo.

Tabla 3. Estudios realizados sobre calidad del aire en Sonora y en algunos estados de México y el mundo.

Lugar	Estudio	Resultados	Referencias
Sonora	Calidad del aire respecto de metales (Pb, Cd, Ni, Cu, Cr) y relación con salud respiratoria: caso Sonora, México	Se observó correlación significativa entre infecciones respiratorias agudas-Cu en Hermosillo y Obregón, y entre Ni-neumonías-bronconeumonías en Guaymas.	Cruz-Campas et al. (2017).
Monterrey	Evaluación de Partículas Suspendidas en el Área Metropolitana de Monterrey	Se encontró Al, Si, Ca, K, Ti, Fe, Pb, S, Ni y V en PM _{2.5} . La quema de combustibles fue la principal fuente de contaminación de la ciudad	Blanco et al. (2015).
Chihuahua	Determinación de PM _{2.5} y Metales en el Aerosol Urbano de la Cd. de Chihuahua, México	Las concentraciones más altas de PM _{2.5} se presentaron durante invierno. Se observaron correlaciones significativas entre Al, Mn, Fe y Mg y las PM _{2.5} .	Canseco-Lajas (2013).
Cd. de México	Analysis of PM _{2.5} and PM ₁₀ in the Atmosphere of México City during 2000-2002	Se encontró Al, Si, Ca, Fe, Cu, Zn, Ba y Pb en PM ₁₀ y PM _{2.5} . Las concentraciones más altas se encontraron en la zona industrial	Vega et al. (2004)
Colombia	Contaminación Atmosférica de Material Particulado Provocada por la Extracción Minera	Se observó correlación lineal significativa en PST/PM ₁₀ y correlación lineal no significativa en PM _{2.5} /PM ₁₀ . Los resultados revelaron variabilidad significativa dependiendo de la ubicación de las estaciones con respecto a los tajos de explotación.	De La Rosa (2008)
China	Heavy metals and Pb isotopic composition of aerosols in urban and suburban areas of Hong Kong and Guangzhou, South China Evidence of the long-range transport of air contaminants	Los elementos Cd, Zn, Mn, Pb y As mostraron mayor bioaccesibilidad. Los riesgos carcinogénicos por inhalación estuvieron dentro de un nivel aceptable, pero hubo riesgo potencial carcinogénico por Pb por ingestión en niños y adultos.	Lee et al. (2007)
Alemania	Metal composition of ambient PM _{2.5} influences severity of allergic airways disease in mice.	La composición de los metales de las PM _{2.5} influye considerablemente en las enfermedades respiratorias alérgicas	Gavett et al. (2003)

CAPÍTULO 5

ÁREA DE ESTUDIO

5.1 Localización del Área de Estudio

El presente estudio se realizó en la estación de monitoreo TEC, ubicada en el Instituto Tecnológico de la ciudad de Cananea, Sonora, México, municipio colindante al norte con los Estados Unidos de Norteamérica, al noroeste con el municipio de Naco, al sur con el municipio de Arizpe y al oeste con el municipio de Imuris. El equipo de captación de partículas de diámetro igual a 2.5 micras ($PM_{2.5}$) de la Red Estatal de Información e Infraestructura sobre Calidad del Aire se encuentra localizado en las coordenadas $39^{\circ}59'20.12''$ latitud norte y $110^{\circ}15'58.53''$ longitud oeste del Estado de Sonora (Figura 1).

5.2 Cananea, Sonora, México

El municipio de Cananea está situado en la región noreste del estado de Sonora entre las coordenadas $30^{\circ}58'$ latitud norte y $110^{\circ}17'$ longitud oeste, se encuentra ubicado a una altura promedio de 1,654 metros sobre el nivel del mar y su territorio está conformado por una extensión total de 4,141.17 kilómetros cuadrados con una población total aproximada de 32,937 habitantes (INAFED, 2004).

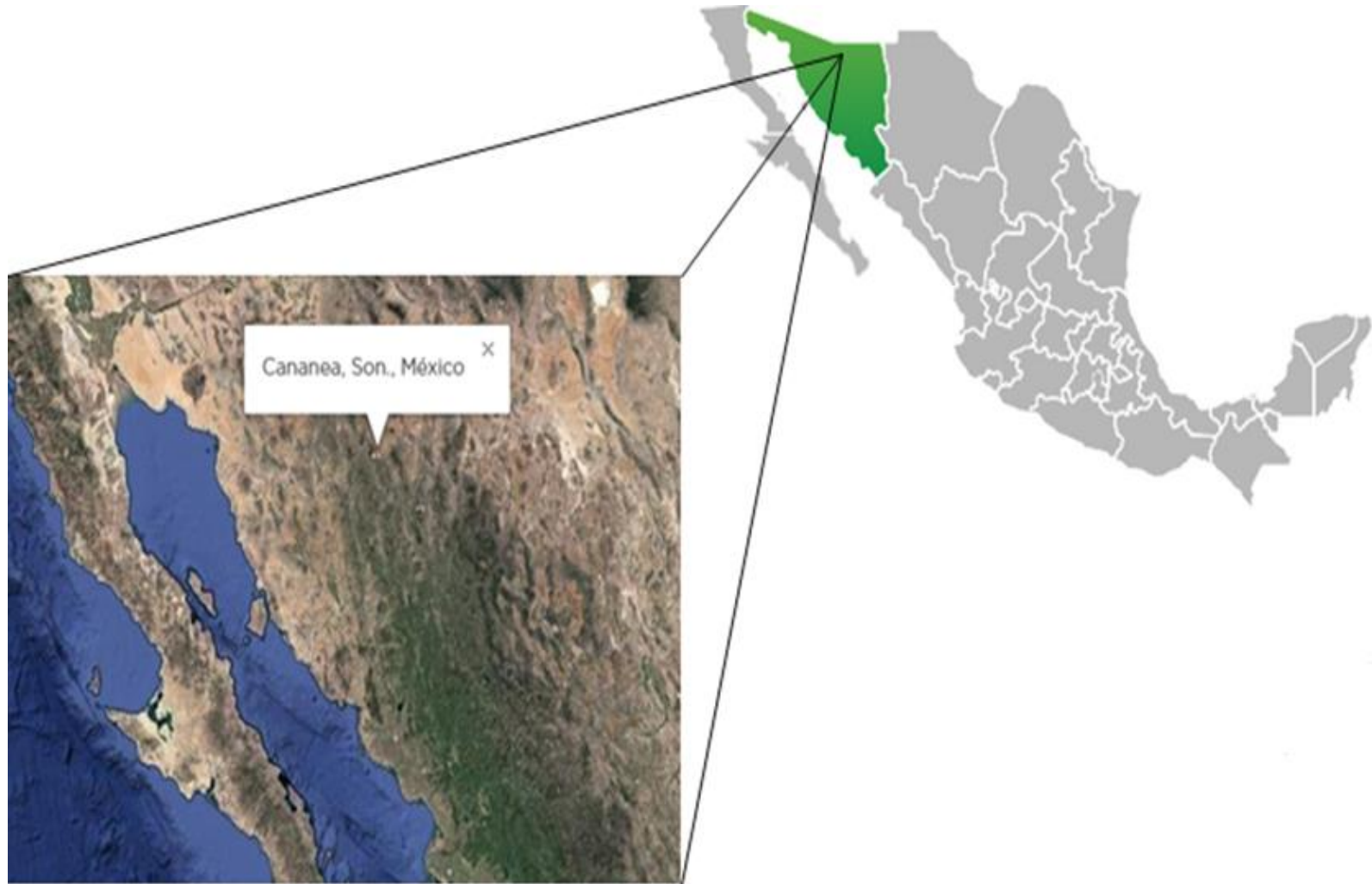


Figura 1. Localización del área de estudio.

5.2.1 Climatología

El municipio de Cananea mantiene un clima semicálido subhúmedo C (w)(x)a(e), con una temperatura media máxima mensual de 23.5° C en los meses de junio a septiembre y con una temperatura media mínima mensual de 7.4° C en diciembre y enero; la temperatura media anual es de 15.3°C. El periodo de lluvias se presenta en verano en los meses de julio a septiembre, contándose con precipitación media anual de 545 milímetros. En los meses de febrero, marzo y abril se llegan a presentar frecuentemente heladas, granizadas y en ocasiones nevadas. En invierno las lluvias son de menor intensidad, pero de mayor duración llamadas equipatas, cayendo también en forma de nieve (INAFED, 2004).

5.2.2 Flora y Fauna

La vegetación de pastizal es predominante en casi la totalidad de la extensión territorial, existe también una gran parte del territorio formado por bosque de encino y en las partes más altas, en las limitaciones son Santa Cruz y de Imuris, existen pequeñas áreas de bosque de pino-encino: Son escasas las áreas para agricultura de riego. La fauna del municipio, la componen básicamente las siguientes especies: 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).

5.2.3 Características del Suelo

En el municipio se localizan los siguientes tipos de suelo: feosem: se ubica en el noreste del municipio, presenta fase física pedregosa, tiene una cara superficial oscura, suave y rica en materia orgánica y nutrientes. En condiciones naturales tienen cualquier tipo de vegetación; litosol: se localiza en la parte central y se extiende hacia el sureste del municipio; presenta diversos tipos de vegetación que se encuentran en mayor o menor proporción en laderas, barrancas, lomeríos y algunos terrenos planos; y regosol: se localiza en el noroeste presentando fase física pedregosa, en el centro se presenta con fase física gravosa y en el suroeste con fase física gravosa y pedregosa; su fertilidad es variable y su uso agrícola está condicionado principalmente a su profundidad. Su susceptibilidad a la erosión es muy variable y depende de la pendiente del terreno (INAFED, 2004).

5.2.4 Población

Según la encuesta intercensal de 2015 realizada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) la población total del municipio de Cananea es de 35,892 habitantes, ocupando el puesto 13 entre los más poblados del estado de Sonora (INEGI, 2015).

CAPÍTULO 6

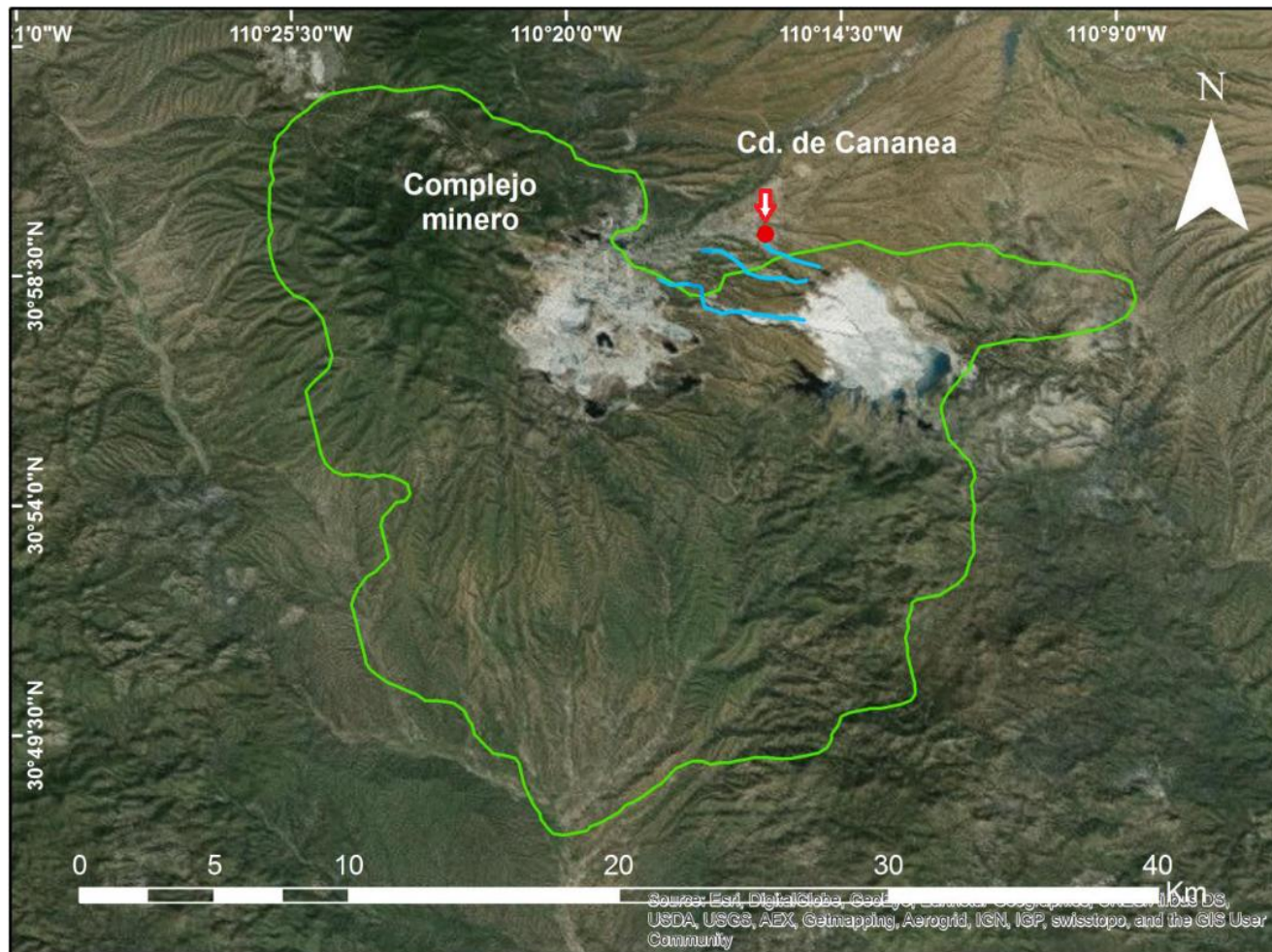
MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Frecuencia y procedimiento de Colecta de Muestras de Aire

La recolección de las muestras se realizó como lo indica la Norma NOM-035-SEMARNAT-1993 (DOF, 1993), donde se especifica como método de muestreo el equipo de Alto Volumen (Hi-Vol). La REIICA (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, estableció una frecuencia de muestreo cada 6 días con muestreos no simultáneos en las estaciones de la Red, concepto que puede aplicarse para el muestreo de $PM_{2.5}$ (Figura 2). Con esta referencia se establece un máximo de 60 a 61 muestras en el año. El monitor de Alto Volumen utilizado en esta investigación se encuentra ubicado en el interior del Instituto Tecnológico de Cananea (TEC), en las coordenadas 39°59'20.12" Latitud Norte y 110°15'58.53" Latitud Oeste.

6.2 Operación de la estación de monitoreo.

El método de muestreo que fue utilizado en el presente proyecto corresponde al de alto volumen (Hi-Vol) establecido en la Norma NOM-035-SEMARNAT-1993 (DOF, 1993) y en el Código de Regulaciones Federales de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (EPA, 1992). Este método permite medir la concentración de $PM_{2.5}$ en el aire ambiente por medio de un muestreador que hace pasar a través de un filtro una cantidad determinada de aire ambiente durante un período de muestreo de 24 horas (Figura 3). La velocidad de flujo del aire ambiente y la geometría del muestreador son tales que favorecen la recolección de partículas hasta de 2.5 micrómetros (μm) de diámetro aerodinámico, dependiendo de la velocidad del viento y su dirección. Los filtros usados tienen una eficiencia de recolección mínima del 99 % para partículas de 0.3 μm .



CIUDAD	MONITOR	Latitud Norte	Latitud Oeste
Cananea	TEC (Tecnológico de Cananea)	39°59'20.12"	110°15'58.53"

Figura 2. Ubicación de la Estación de Monitoreo (TEC) en la Ciudad de Cananea, Sonora.

La Norma NOM-156-SEMARNAT-2012 (DOF, 2012) establece las condiciones mínimas que deben ser tomadas en cuenta para el establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire desde su colocación, hasta su funcionamiento, tales como la colocación a una altura adecuada (para zonas urbanas de 2 a 15 metros sobre el suelo), deben ubicarse a 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). Una vez instalado el monitor se procede a realizar una limpieza general del mismo, posteriormente se le aplica un silicón en aerosol a la charola retenedora que realiza la separación de las partículas para después colocar el filtro previamente acondicionado. Por último, se programa el Timer de inicio y término, para que trabaje por un lapso de 24 horas continuas, y al término de esto se retira el filtro con la muestra colectada, registrando las horas trabajadas y la medición de flujo (Figura 3).



Figura 3. Muestreador de alto volumen (HI-VOL).

6.3 Almacenamiento y Transporte de las Muestras (Filtros)

En lo referente al muestreo de campo, no se tuvo participación alguna, por lo que se asignó la participación de personal calificado, el cual estuvo en comunicación constante con los responsables por parte de la Universidad de Sonora. Para la realización de la entrega de los filtros, las muestras fueron almacenadas en un sobre de papel previamente etiquetadas en base a su numeral de serie y la fecha correspondiente a cada muestreo. Posteriormente fueron proporcionadas al personal académico de la Universidad de Sonora donde se procedió a realizar los análisis de laboratorio correspondientes.

6.4 Análisis de Laboratorio

Con la finalidad de asegurar la calidad de los resultados analíticos obtenidos, se siguió la metodología recomendada en el Manual de Aseguramiento de Calidad para Sistemas de Medición de Contaminación del Aire (EPA ,1998) y las Normas Oficiales Mexicanas (NMX-AA-115-SCFI-2001, NMX-AA-051-SCFI-2001).

6.4.1 Preparación de los filtros (acondicionamiento) para la colecta de las muestras de aire.

Para el almacenamiento y acondicionamiento del filtro, primero se enumeran en base a un registro de control en base a la identificación del monitor, la numeración debe ser en las esquinas para evitar que la tinta contamine las muestras, sucesivamente se inicia el proceso de secado en una estufa donde se pesa el filtro de manera inicial y se continúa tomando nota de los pesos mientras se mantienen secando en un desecador que contiene sílica gel activada, misma que ayuda al proceso de absorción total de humedad del filtro por un periodo no menor a 24 horas o hasta obtener un peso constante, denominado peso inicial. Posteriormente se realiza la colocación de los filtros en las bases portafiltros para su traslado a los monitores.

6.4.2 Determinaciones analíticas: material particulado $PM_{2.5}$, Metales (Cd, Cu, Pb) y Metaloides (As, Si)

6.4.2.1 Material Particulado ($PM_{2.5}$)

Para la determinación analítica de $PM_{2.5}$ se utilizó el método establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-035-ECOL-1993 (DOF, 1993), la cual coincide con el método establecido en la normatividad de EUA (EPA, 1992). En este método, las $PM_{2.5}$ en el aire ambiente se recogieron en un filtro de fibra de vidrio durante 24 horas utilizando un muestreador de aire de alto volumen, donde el filtro fue pesado (después de equilibrar la humedad) antes y después de usarlo, para determinar el peso (masa) neto ganado. El volumen total de aire muestreado, corregido a las condiciones estándar (25°C, 760 mmHg), se determina a partir de la velocidad de flujo de medida y el tiempo de muestreo. La concentración total de partículas suspendidas en el aire ambiente se calcula como la masa de partículas recolectadas, dividida por el volumen de aire muestreado, corregida de acuerdo con las condiciones estándar y expresadas en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ estándar.

$$PM_{2.5} = \frac{(W_f - W_i) * 10^6}{V_{ref}} \quad (1)$$

Donde:

$PM_{2.5}$ = concentración másica de $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

W_f, W_i = peso final e inicial del filtro recolector de partículas de $PM_{2.5}$ (g)

10^6 = conversión de (g) a (μg)

V_{ref} = aire total muestreado en unidades de volumen referencia (m^3)

6.4.2.2 Metales (Cd, Cu, Pb) y Metaloides (As, Si)

La metodología para la determinación de metales es la establecida bajo el procedimiento para la determinación de plomo en partículas suspendidas, recomendada en el CFR 40 (1992), cuyo principio se basa en coleccionar las partículas suspendidas en el aire en un filtro de fibra de vidrio, utilizando un muestreador de alto volumen. Una vez secados los filtros y realizados los cálculos para la determinación de la concentración de $PM_{2.5}$, se realizó la determinación de metales en los filtros limpios (blancos de las muestras) y en los expuestos (muestras). Los metales del material particulado muestreado son solubilizados por extracción ácida con una mezcla de ácido nítrico y ácido clorhídrico, para posteriormente analizarse por espectrometría de absorción atómica por flama utilizando un equipo de absorción atómica PERKIN-ELMER, Modelo AAnalyst 400. La concentración de cada metal se realizó a través de la siguiente ecuación:

$$C = \frac{\left(\frac{\mu\text{g}}{\text{mL}}\right) \left(\frac{100 \text{ mL}}{\text{tira}}\right) (12 \text{ tiras} * \text{filtro}) - F_b}{V_{STP}} \quad (2)$$

Donde:

C = concentración ($\mu\text{g} / \text{m}^3$)

$\mu\text{g} / \text{mL}$ = lectura registrada por el equipo de absorción atómica

100mL/tira = volumen total de muestra

12 tiras = área total del filtro utilizable, 8" x 9"; área expuesta de una tira, 3/4"x 7"

Filtro = área total de una tira, 8" x 9"

F_b = concentración del filtro, (μg) (blanco)

V_{STP} = Volumen de aire total filtrado (m^3)

6.5 Control de Calidad en el Muestreo y Análisis de las Muestras de Filtros

Con la finalidad de obtener datos confiables que sean precisos y exactos, se llevó a cabo un procedimiento de control de calidad en los métodos utilizados en el análisis químico de metales en las muestras de filtros. El procedimiento consistió en un estricto control de los siguientes puntos: limpieza de equipos y material de cristalería, procedimiento de calibración y frecuencia (estándares de calibración), precisión (muestras duplicadas) y exactitud (recuperación de concentración de estándares conocidos), donde se obtuvieron resultados conforme a lo establecido en los referentes nacionales e internacionales, como la EPA (1998) y la Norma Oficial Mexicana (NMX-AA-051-SCFI-2001), lo que asegura que la validación de los resultados sea de alta confiabilidad (ANEXO 1, Tablas de la 1a a la 1j).

En la Tabla 4, se aprecian los rangos en que fluctuaron los resultados obtenidos para cada uno de los puntos anteriores. Se puede apreciar que los datos resultantes de la descomposición de los blancos de digestión corresponden a valores menores al límite de detección (L.D) y un valor máximo de 0.287 $\mu\text{g} / \text{mL}$. Para el caso del coeficiente de correlación referente a la curva de calibración del equipo de absorción atómica, éste se mantuvo en un intervalo de $r = 0.9994 - 1$ el cual se considera aceptable para la asociación entre las variables absorbancia y concentración. En lo correspondiente a los indicadores de calidad de los datos (precisión y exactitud) se obtuvieron resultados aceptables al encontrarse dentro de lo recomendado por la EPA (1998) y la Norma Oficial Mexicana (NMX-AA-051-SCFI-2001), esto es que se aprecian valores de precisión expresados como desviación porcentual relativa (DPR) menores al 35 %, mientras que para exactitud los resultados expresados en porcentaje de recuperación oscilaron entre 90.8% - 105.47%, los cuales se encuentran dentro del rango recomendado (85 - 115%).

Tabla 4. Resultados del control de calidad

Prueba	Criterio	Límite de Aceptación	Resultados
Blancos de digestión		\leq LD****	< LD - 0.287 ($\mu\text{g}/\text{mL}$)
Calibración	Coefficiente de correlación (r)	($r > 0.99$)	$r = 0.9994 - 1$
Precisión (duplicados)	DPR*	DPR < 35%**	< LD - 14.29
Exactitud (recuperación)	% de Recuperación	85 – 115 %***	90.8% - 105.47%

*Desviación Porcentual Relativa

**EPA (1998)

***NMX-AA-115-SCFI-2001

****LD = Límite de detección

6.5.1 Preparación y limpieza de los equipos de muestreo y material de cristalería

El material utilizado para la preparación (corte del filtro), descomposición y análisis de los filtros (incluyendo el material utilizado en el laboratorio), se sometió a un control estricto para evitar una posible contaminación, principalmente de metales. Para esto, se utilizó la metodología recomendada por la Norma Oficial Mexicana (NMX-AA-115-SCFI-2001).

El procedimiento de limpieza consistió en someter el material de laboratorio a un lavado con detergente, enjuague con agua corriente y sumergirlo en una disolución de ácido nítrico al 20% (v/v) durante 3 días. Posteriormente se enjuagó con agua deionizada, se secó y se guardó en bolsas de plástico para su posterior utilización.

6.5.2 Blancos de digestión

Durante la descomposición de las muestras (filtros) se incluyeron blancos reactivos por triplicado y muestras duplicadas, con la finalidad de verificar la calidad de la descontaminación, colecta y procedimientos de manejo. Las muestras duplicadas se

seleccionaron al azar, y fueron colectadas en un porcentaje del 10% en relación al total de muestras, las cuales fueron sometidas a una extracción ácida bajo el mismo protocolo que a los demás filtros.

Como se puede apreciar en la Tabla 4 y en el ANEXO 1 (Tablas 1a y 1b) los resultados de los blancos de digestión obtenidos durante la descomposición de las muestras (filtros) fluctuaron entre valores no detectables, es decir, menores al límite de detección (L.D.) y 0.287 $\mu\text{g}/\text{mL}$; esto indica que no se presentó contaminación externa debido a los ácidos ni del material de cristalería utilizados en la digestión de las muestras. Cabe mencionar que la digestión de los filtros (blancos) se realizó por triplicado.

6.5.3 Calibración y Estandarización de los Equipos de Muestreo

El equipo analítico de laboratorio (balanza analítica, espectrofotómetro de absorción atómica Analyst 400) fué calibrado en base a los manuales del fabricante. Se utilizaron reactivos de alta pureza analítica y se elaboró una curva de calibración empleándose un mínimo de 4 estándares para la determinación de metales. Para estimar si los puntos experimentales se ajustan bien a una línea recta, se calculó el coeficiente de correlación, el cual fluctuó entre $r = 0.9994$ a 1, por lo que se considera aceptable para la asociación entre las variables absorbancia y concentración debido a que se cumple con lo recomendado establecido en la Norma Oficial Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2001 (Tabla 4, ANEXO 1, Tablas 1c y 1d).

Por otra parte, con la finalidad de conocer si la validez de la curva de calibración es aceptable para ser utilizada para estimar la concentración del metal de interés, se analizaron estándares de alta pureza (Baker) con concentraciones conocidas para tres niveles diferentes de concentración (baja, media y alta) que corresponden a 0.50, 1.00 y 2.00 mg/L estableciéndose una variación menor al 10% con respecto a la concentración del estándar. Como se puede apreciar en la Tabla 4 y en el ANEXO 1, (Tablas 1e y 1f) los resultados se mantuvieron entre un 90.8%-105.47% los cuales se encuentran en el rango recomendado para metales el cual es de 85 a 115% de recuperación que establece la Norma Oficial Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2001. Por lo tanto, las curvas de calibración para los metales y metaloides de interés se consideran aceptables.

6.6 Precisión

Se define como el grado de conformidad con que un grupo de mediciones realizadas bajo las mismas condiciones experimentales para una misma sustancia o propiedad, no diverge mucho de la media encontrada, es decir, presenta un coeficiente de variación pequeño (Clavijo, 2002). En el presente trabajo se evaluó la precisión mediante el análisis de réplicas que fueron elegidas al azar y recibieron el mismo proceso de corte, digestión y análisis que las demás muestras. Para estimar la precisión de los métodos analíticos se utilizaron muestras fortificadas con concentraciones del parámetro de interés a partir de reactivos de alta pureza y fue calculada a través de la diferencia porcentual relativa (DPR), utilizando la siguiente ecuación:

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

Donde:

a = Valor mayor del análisis de los dos duplicados

b = Valor menor del análisis de los dos duplicados

Los resultados obtenidos en cuanto a la precisión obtenida en las muestras duplicadas se mostraron en la Tabla 4, donde se pudo apreciar que el 100 % de los valores de precisión obtenidos expresado como Desviación Porcentual Relativa (% DPR), se encuentran dentro del 35% (ANEXO 1, Tablas 1g y 1h). Esto indica que el procedimiento de digestión de las muestras duplicadas (filtros) y la cuantificación de los metales y metaloides por la técnica de Espectroscopia de Absorción Atómica es confiable.

Por otra parte, la precisión (repetibilidad) obtenida de muestras fortificadas con estándares de alta pureza analítica (Baker), para tres niveles diferentes de concentración (baja, media y alta), que corresponden a 0.50, 1.00 y 2.00 mg/L, se pueden apreciar en el ANEXO 1 (Tablas 1i y 1j). Los resultados obtenidos presentan valores de desviación estándar que fluctuaron en un intervalo de 0 a 0.071, los cuales indican una variabilidad mínima.

6.7 Exactitud

La exactitud de una medición es el grado de concordancia entre el resultado de una medición y un valor verdadero del objeto que está siendo medido. En la presente investigación los resultados obtenidos se expresan como porcentaje de recuperación:

$$\text{Recuperación} = \frac{a}{b} * 100 \quad (4)$$

Donde:

a = Concentración adicionada a la muestra

b = Concentración medida en la muestra

En la presente investigación se llevaron a cabo determinaciones de tres muestras de concentración conocida de estándares de alta pureza analítica (0.5, 1.0, 2.0 ppm), para cada uno de los metales estudiados, los cuales se analizaron al principio, en medio y al final de la corrida del análisis de las muestras.

Los resultados obtenidos del % de recuperación se presentan en la Tabla 4 y en el ANEXO 1 (Tablas 1e y 1f). Se puede apreciar que para los metales y metaloides para una concentración de 0.5 µg/mL, el % de Recuperación fluctuó en un rango de 90.80% a 103.31%; para una concentración de 1 µg/mL, fluctuó en un rango de 91.40% a 105.47%, y para una concentración de 2.0 µg/mL, fluctuó de 91.75% a 103.5%.

Estos resultados se encuentran dentro del rango de 85 a 115% de Recuperación como lo recomienda la Norma Oficial Mexicana (NMX-AA-051-SCFI-2001). Por lo tanto, los resultados se consideran aceptables, ya que indican que el procedimiento de digestión de las muestras (filtros) y el funcionamiento del equipo de absorción atómica fueron las óptimas.

Con base a lo anterior se establece que en ninguna de las pruebas de recuperación se rebasó el criterio de calidad aceptable para exactitud, fluctuando entre un rango de 90.8 - 105.47 %, concluyendo así que la prueba de exactitud fue satisfactoria y que el procedimiento y análisis de los filtros fue correcto.

6.8 Límite de Detección del Instrumento (L.D.)

El límite de detección de un analito es aquella concentración que proporciona una señal en el instrumento significativamente diferente de la señal de una muestra en “blanco” o “señal de fondo”. En la presente investigación se calculó el criterio del Límite de Detección, como la cantidad de concentración del analito que proporciona una señal igual a la señal del blanco (YB), más tres veces la desviación estándar del blanco (SB) (Miller y Miller, 1993):

$$YLDI = YB + 3SB \quad (5)$$

En algunos casos las mediciones de los contaminantes pueden ser muy cercanas a cero, por lo cual el valor medido puede ser menor que el Límite de Detección (L.D.), ante esta situación es recomendable reportar un valor numérico (usualmente el límite de detección) precedido por un signo menor que “< LD”. La ausencia de estos datos puede hacer difícil resumir, calcular o comparar series de datos, incluso puede conducir a estimaciones sesgadas y resultados engañosos en medias, varianzas, tendencias o pruebas estadística. Richard (1987), sugiere que se pueden reemplazar los valores de las mediciones menores al L.D. por algún valor entre cero y el L.D., tal como la mitad del L.D.

Ante la situación antes descrita, en el presente trabajo se sustituyeron aquellos datos que presentaron un valor menor al límite de detección utilizando el valor medio entre el cero y el límite de detección para proceder a aplicar un análisis estadístico No Paramétrico utilizando la Prueba de Van der Waerden. Esto es con la finalidad de conocer el comportamiento temporal de los parámetros PM_{2.5}, metales y metaloides en el aire ambiente de la ciudad del Cananea, Sonora durante el ciclo anual 2018. Los valores del límite de detección del instrumento (absorción atómica) se pueden apreciar en el ANEXO 1 (Tablas 1c y 1d).

6.9 Normas de Calidad y/o Criterios de Calidad del Aire, Utilizados en la Presente Investigación

Los criterios utilizados en la presente investigación con la finalidad de determinar la calidad del aire respecto a metales y metaloides son los siguientes:

- Indicadores de calidad del aire
- NOM-025-SSA1-2014 (DOF,2014)
 - o Días por encima del máximo permisible
- Días con buena, regular y mala calidad del aire (SEMARNAT, 2014)

El criterio de calidad del aire para metales fue la comparación con las siguientes normas:

- Plomo: Junta Central de Control de la Contaminación de la India (CPCB, 2009)
- Cadmio: Organización Mundial de la Salud (WHO, 2005)
- Cobre: Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA, 2010),
- Arsénico: Junta Central de Control de la Contaminación de la India (CPCB, 2009).
- Silicio: Organización Internacional de Normalización (ISO, 1995).

6.10 Criterio de cobertura de datos

La Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, establece que para verificar su observancia se requerirá cumplir con una cobertura de muestreos mínima de 75 % de muestras válidas por trimestre, y tres trimestres cumpliendo el requisito citado para evaluar positivamente el año, se establece además que en los sitios donde el monitoreo no se realice diariamente se tomará como base el número de muestreos calendarizados para dicho periodo. En la Tabla 4, se presenta la evaluación del criterio de completación o cobertura de datos para cada una de las ciudades del presente estudio. Para el caso de la ciudad de Cananea se cumplió con dicho criterio.

Tabla 5. Evaluación del criterio de completión o cobertura para muestreos de PM_{2.5} en Cananea, Sonora, durante el año 2018.

Trimestre	Muestras Programadas	75% de lo Programado	Muestras Válidas	Cumple
Ene-Mar 2018	15	11	15	Si
Abr-Jun 2018	16	12	16	Si
Jul-Ago 2018	15	11	15	Si
Sep-Oct 2018	15	11	15	Si

6.11 Estadística descriptiva

Según lo descrito por Diggle et al. (2013) y Sonnad (2002), la estadística descriptiva es la rama de la estadística que formula recomendaciones sobre cómo resumir la información de manera clara y sencilla. Por lo anterior, con la finalidad presentar evidencia objetiva que cumpla con los objetivos de esta investigación, los resultados obtenidos fueron exhibidos a través de tablas, gráficas, cuadros o figuras que dieron coherencia, orden, ejemplos e integrando cada uno de los puntos que comprende el presente trabajo.

6.12 Análisis de Varianza (Prueba No paramétrico de van der Waerden)

La información obtenida fue evaluada estadísticamente para detectar diferencias significativas entre las 4 estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno) a través del análisis de varianza No Paramétrico utilizando la Prueba de van der Waerden (NIST, 2009), utilizando el paquete estadístico Software JMP, versión 5.0.1.

Se utilizó una prueba no paramétrica ya que se observó que los datos de la presente investigación no siguen una distribución normal. El procedimiento de la Prueba de van der Waerden es el siguiente: Los datos consisten de k muestras aleatorias, posiblemente de diferentes tamaños. Las hipótesis a probar son:

Ho: Las funciones de distribución de las k poblaciones son idénticas.

Ha: Al menos una función de distribución es diferente

Sea $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in}$ la i-ésima muestra de tamaño n_i . N es el número total de observaciones: $N = n_1 + n_2 + \dots + n_k$; donde n_i = al tamaño de la i-ésima muestra. Se asignan rangos a los N valores, utilizando rangos promedios en el caso de empates. Sea $R(X_{ij})$ el rango de X_{ij} . Se convierte cada rango $R(X_{ij})$ en el valor A_{ij} :

$$A_{ij} = R(X_{ij})/N+1 \quad (6)$$

de tal forma que corresponde a la siguiente probabilidad: $P(Z \leq Z_{ij}) = A_{ij}$, donde la Z es una variable con distribución Normal estándar (es decir media cero y varianza uno), y por lo tanto, se busca en la tabla de la distribución Normal estándar el valor A_{ij} y localizando el valor correspondiente de Z_{ij} . Posteriormente, se calcula el valor promedio de los Z_{ij} para cada muestra:

$$\bar{Z}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} Z_{ij} \quad (7)$$

Donde $i = 1, 2, \dots, k$ y la varianza total:

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{\text{todos los } Z_{ij}} Z_{ij}^2 \quad (8)$$

El estadístico de prueba es:

$$T = \frac{1}{S^2} \sum_{i=1}^k n_i (\bar{Z}_i)^2 \quad (9)$$

Se rechaza Ho al nivel de significancia α si T es mayor que el $1-\alpha$ percentil de una distribución χ^2 con k-1 grados de libertad. En las tablas de resultados se mostrará un valor p, el cual representa la probabilidad necesaria para rechazar Ho. Si Ho es rechazada

entonces se realizan comparaciones múltiples para encontrar cuáles poblaciones son diferentes. Se dice que las poblaciones i y j son diferentes si se cumple la siguiente desigualdad:

$$|\bar{Z}_i - \bar{Z}_j| > t_{1-\alpha/2, k-1} \left(S^2 \frac{N-1-T}{N-k} \right) \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right) \quad (10)$$

6.13 Análisis de correlación entre las variables del presente estudio (PM_{2.5}, metales y metaloides)

El coeficiente de correlación de Spearman es una prueba no paramétrica utilizada cuando se desea medir la relación entre dos variables y no se cumple el supuesto de normalidad en la distribución de tales valores y se designa por r_s (Barreto, 2011).

La interpretación de este coeficiente es igual que la del coeficiente de correlación de Pearson. Oscila entre -1 y +1, indicándonos asociaciones negativas o positivas respectivamente, 0 cero, significa no correlación, pero no independencia (Barreto, 2011).

Se utiliza en las investigaciones muy frecuentemente en base a la necesidad de determinar la relación entre dos variables cuantitativas. Por lo general, los objetivos son los siguientes:

- Determinar si las dos variables están correlacionadas, es decir, si los valores de una variable tienden a ser más altos o más bajos para valores más altos o más bajos de la otra variable.
- Poder predecir el valor de una variable, dado un valor determinado de la otra variable.
- Valorar el nivel de concordancia entre los valores de las dos variables (Pita y Pértega, 2001).

6.14 Rosa de los vientos

La rosa de los vientos, también llamada rosa náutica, es un instrumento marino que se utiliza para representar la circunferencia del horizonte mediante el uso de 32 rombos unidos por sus extremos. Es común verla también representado un esquema que simboliza el posible rumbo y magnitud de los vientos, su utilidad principal radica en que proporciona la dirección o direcciones principales con su frecuencia en un diagrama circular (Guerrero, 2011).

Este instrumento náutico tiene varias divisiones o partes. Las cuatro principales y fundamentales indican los cuatro puntos cardinales: Norte, Sur, Este y Oeste (la letra W también suele utilizarse para mencionar al Oeste en países anglosajones) son cuatro y se sitúan de forma que fraccionan o seccionan el círculo en cuadrantes. El Norte es el punto cardinal que se utiliza como referencia para las mediciones y entre cada uno de los cuatro puntos cardinales hay una distancia de 90° (Guerrero, 2011).

En el presente estudio se utilizó la rosa de los vientos con la finalidad de observar la dirección preferencial de los vientos en el sitio de estudio.

CAPÍTULO 7

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Comportamiento general del material particulado $PM_{2.5}$ comparado con la velocidad del viento durante ciclo anual 2018.

En el periodo anual estudiado se obtuvieron 61 muestras validas de $PM_{2.5}$ a través la estación de monitoreo ubicada en Instituto Tecnológico de Cananea. La Figura 4, presenta el comportamiento general de los datos obtenidos durante el análisis y que fueron comparados con la NOM-025-SSA1-2014, en donde se especifica un límite permisible diario para $PM_{2.5}$ de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y un límite promedio anual de $12\mu\text{g}/\text{m}^3$. En la gráfica claramente se puede apreciar que ninguno de los resultados rebasó el valor máximo permisible para 24 horas establecido por la norma citada anteriormente.

Las variaciones de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en comparación con la velocidad del viento durante los días muestreados se muestran en la Figura 4. Se aprecia a simple vista que la acumulación de las concentraciones de $PM_{2.5}$ se disipa con la disminución de la velocidad del viento durante la mayoría de los meses del año, es decir, las concentraciones de material particulado son mayores en los días en que las velocidades de los vientos son superiores.

Es importante recordar que tanto la concentración de los contaminantes atmosféricos como el material particulado depende de las condiciones de dispersión de la atmósfera y de las condiciones meteorológicas, como turbulencias atmosféricas, velocidad y dirección del viento, etc. Este tipo de fenómenos podrían provocar acumulación en zonas próximas a las fuentes de emisión o transporte de los mismos a zonas más o menos alejadas.

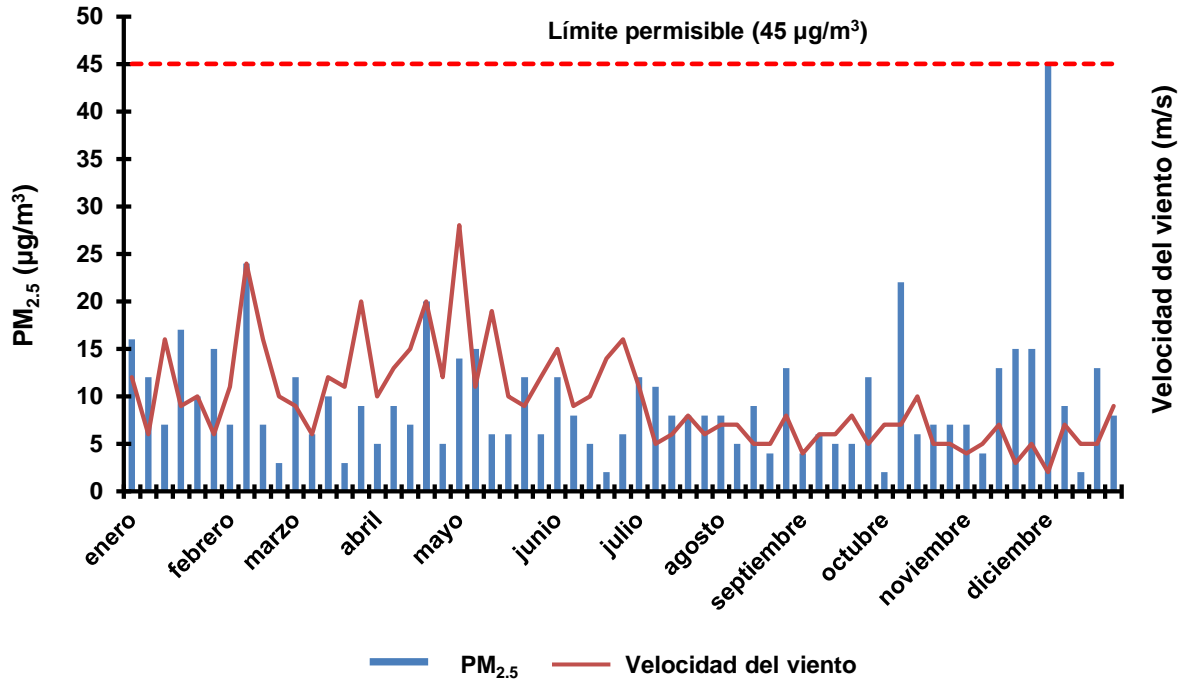


Figura 4. Comparación de la concentración de $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) con el valor máximo permisible ($45 \mu g/m^3$) para 24 horas y la velocidad del viento durante el ciclo anual 2018.

7.1.1 Concentración Máxima, Mínima y Promedio Anual

Respecto a los rangos de fluctuación de las concentraciones obtenidas durante el período de estudio se observa que el valor máximo alcanzado fue de $45 \mu g/m^3$, mientras que el valor mínimo percibido fue de $2 \mu g/m^3$ (Figura 5). En lo referente al promedio anual, como ya se mencionó anteriormente, la NOM-025-SSA1-2014 establece un límite promedio anual de $12 \mu g/m^3$, para el caso de Cananea, Sonora, la concentración promedio anual alcanzó un valor de $9.7 \mu g/m^3$ por lo que es evidente que no se incumplió con la norma mencionada anteriormente.

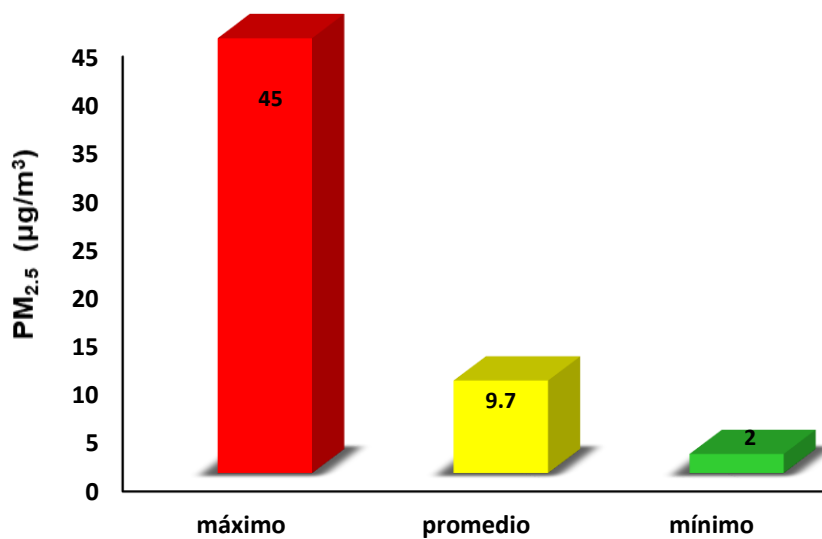


Figura 5. Valores máximo, promedio y mínimo de $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en la ciudad de Cananea, Sonora, México, durante el año 2018.

7.1.2 Comportamiento trimestral del Material Particulado $PM_{2.5}$

Trimestre 1

Durante el trimestre comprendido entre los meses de enero, febrero y marzo, se observaron concentraciones que fluctuaron en el rango de 3 y $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 6, ANEXO 2; Tabla 2a). Se puede apreciar que la concentración máxima ($24 \mu\text{g}/\text{m}^3$) fue registrada el 12 de febrero de 2018, mientras que la concentración mínima se manifestó tanto en el mes de marzo (día 20) como en el mes de febrero (día 24). En este período de estudio se presentaron temperaturas entre 5°C y 17°C con escasas precipitaciones (ANEXO 3, Tabla 3a).

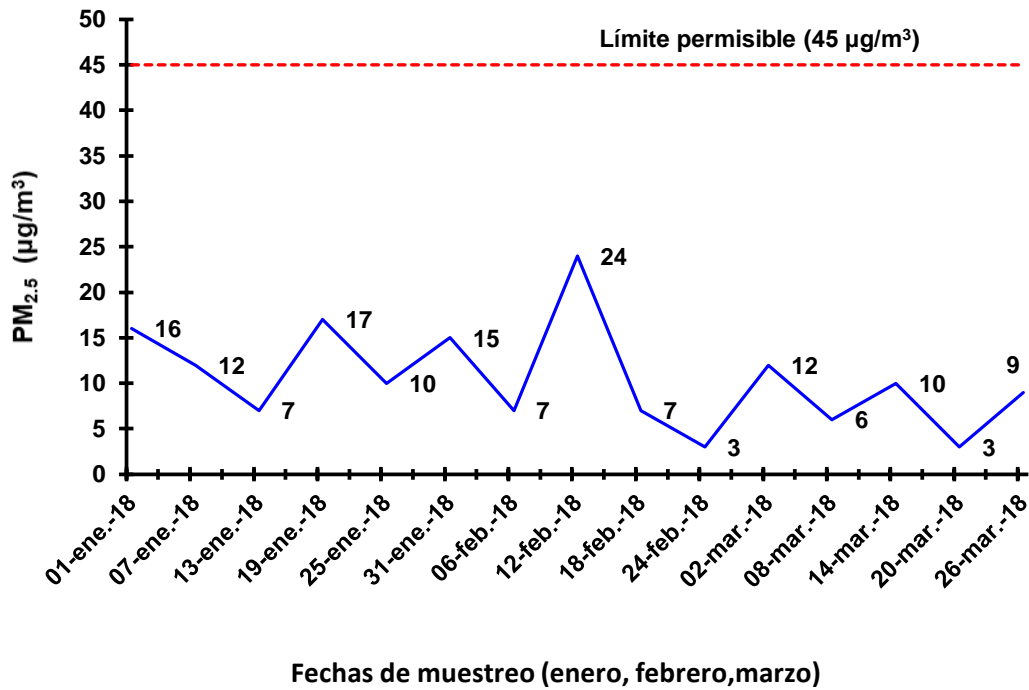


Figura 6. Comportamiento de la concentración de PM₂₅ (µg/m³) durante el Trimestre 1.

Trimestre 2

En el segundo trimestre del año de estudio, la concentración más baja se registró en el día 24 del mes junio siendo esta de 2 µg/m³, mientras que la concentración más alta se observó el día 19 del mes de abril con 20 µg/m³ (Figura 7, ANEXO 2; Tabla 2b). Los días de muestreo presentaron temperaturas oscilantes entre 12°C y 28°C con cero precipitaciones (ANEXO 3, Tabla 3b).

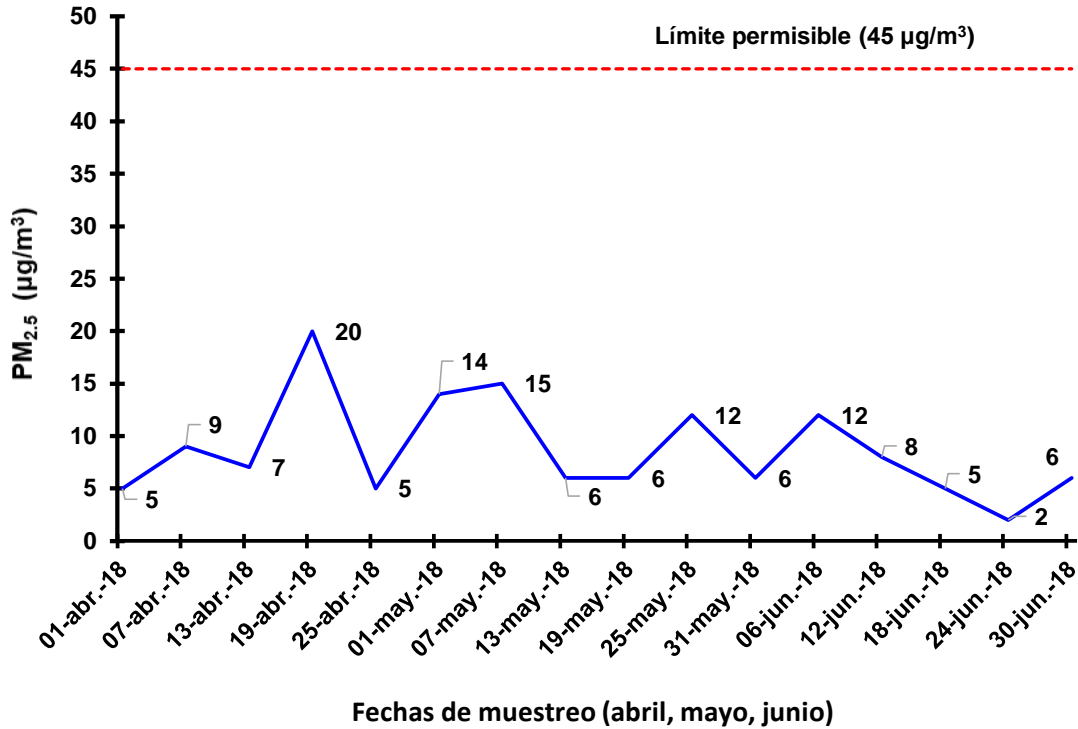


Figura 7. Comportamiento de la concentración de PM_{2.5} (µg/m³) durante el Trimestre 2.

Trimestre 3

Los resultados del tercer trimestre del año indican concentraciones que oscilaron entre 4 µg/m³ y 13 µg/m³ (Figura 8, ANEXO 2; Tabla 2c). A diferencia de los dos trimestres anteriores, durante los meses de julio, agosto y septiembre se presentaron precipitaciones de hasta 20 mm y la temperatura fluctuó entre 20°C y 30°C, siendo las más altas del año (ANEXO 3, Tabla 3c).

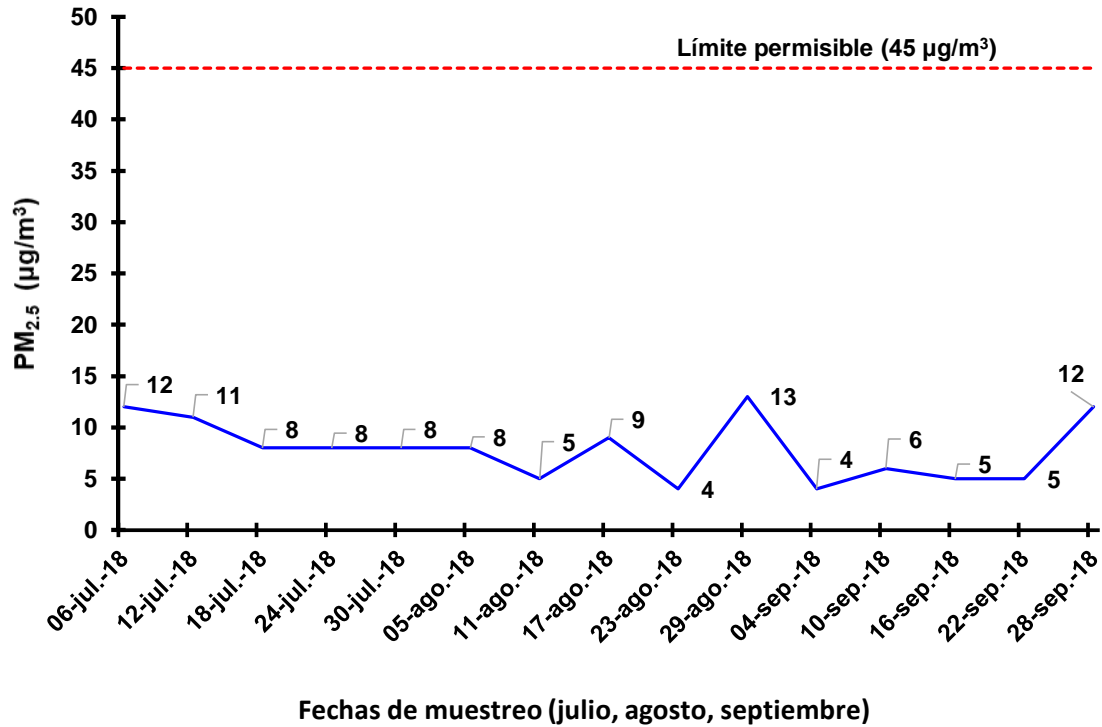


Figura 8. Comportamiento de la concentración de PM_{2.5} (µg/m³) durante el Trimestre 3.

Trimestre 4

Por último, durante el trimestre comprendido entre los meses de octubre, noviembre y diciembre se registraron concentraciones que varían entre los 2 µg/m³ y 45 µg/m³ siendo esta la más baja y más alta del periodo de estudio (Figura 9; ANEXO 2; Tabla 2d). Respecto a las condiciones climatológicas es importante mencionar que en el transcurso de este trimestre ocurrieron las primeras nevadas del invierno y algunas precipitaciones, con temperaturas entre 5 °C y 21°C.

Como dato adicional fundamental es importante señalar que para el caso de los 45 µg/m³ acontecido el día 03 de diciembre coincidió con el inicio de las peregrinaciones como parte de una de las tradiciones de la ciudad que se llevan a cabo cada año, donde gran cantidad de feligreses de la religión católica recorren los principales barrios de la ciudad, es preciso mencionar que muchas de las calles de la entidad no cuentan con pavimentación, generándose así considerables cantidades de material particulado.

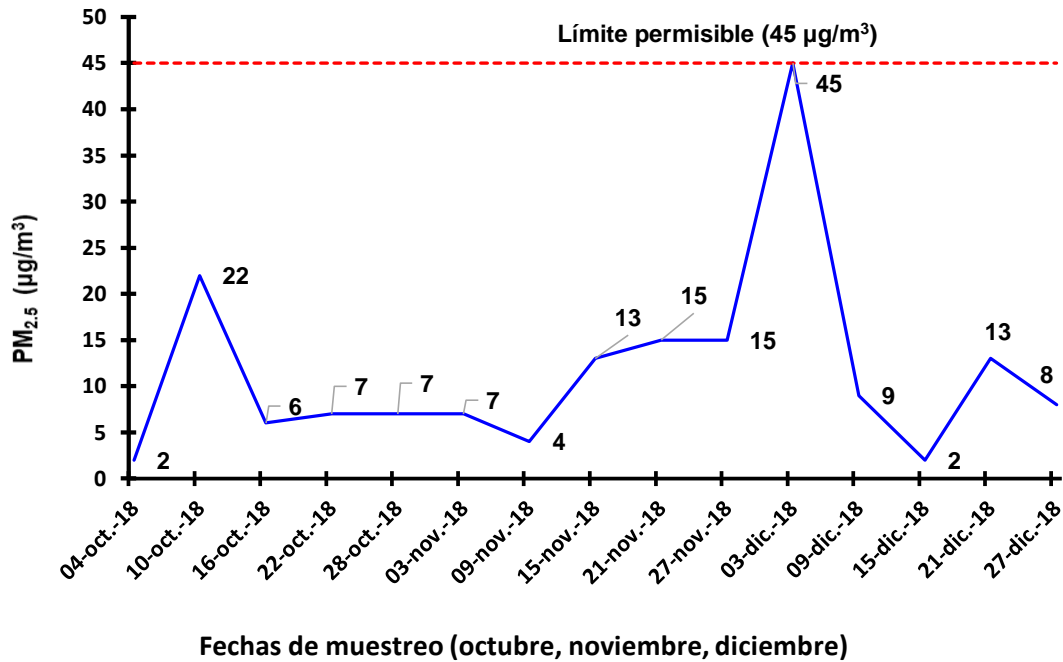


Figura 9. Comportamiento de la concentración de PM_{2.5} (µg/m³) durante el Trimestre 4

Cabe mencionar que la información climatológica reportada en esta investigación no ayuda de manera contundente a conocer una posible relación o la causa de la presencia de los componentes particulados en aire ambiente. Esto es debido a que, si bien establecen las direcciones preferenciales del viento no dan idea del momento en que éstas ocurren, por lo que su relación con los días específicos de monitoreo no es posible determinar.

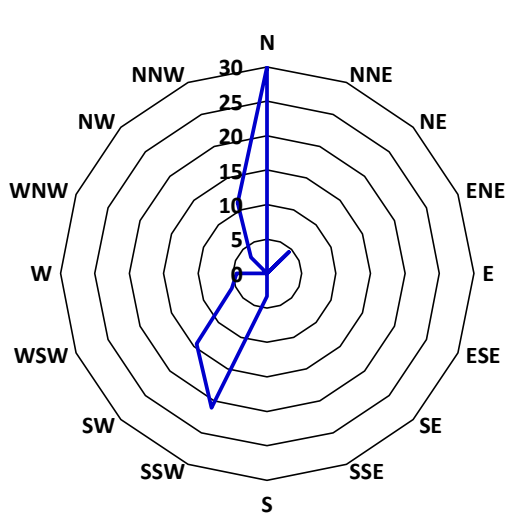
7,1.3 Comportamiento del clima

Durante el primer trimestre del año las procedencias de los vientos presentaron una predominancia en dirección N-NNW, cuyo porcentaje de datos corresponde a un 42 %; seguida de una dirección secundaria en SSW-SW con un 36.4 %. En cuanto a las velocidades del viento oscilaron entre 1 a 5 m/s, con un 43 %, seguido de velocidades más altas de 6 a 10 m/s, con un 23 %, y por último en menor porcentaje los vientos correspondientes entre 11 y 15 m/s, con un 15 % (Figura 10, ANEXO 3, Tabla 3a).

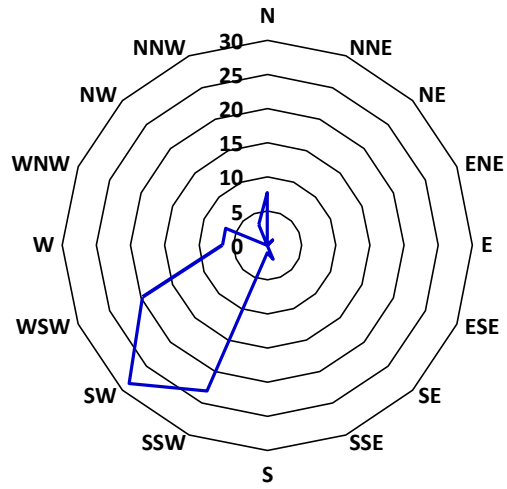
Respecto al trimestre comprendido de abril a junio, la predominancia de los vientos fue en dirección SSW-SW- WSW, cuyo porcentaje corresponde al 74%, con un valor más alto (30%) para la dirección SW, seguido de SSW (24%) y WSW (20%) (Figura 10). En cuanto a las velocidades del viento, oscilaron entre 11 a 15 m/s, con un 47 %, seguido de un rango de 6 a 10 m/s, con un 31 %, y en tercer lugar se encuentra las comprendidas entre 16 a 20 m/s, con un 15 % (ANEXO 3, Tabla 3b).

La dirección predominante en el tercer trimestre del periodo de estudio fue en dirección S, con porcentaje de datos del 30.33 %; seguida de una dirección secundaria que va de W-WNW-NW con los siguientes porcentajes respectivamente: 13.5%, 12.35% y 12.35%, del total de los datos (Figura 10). En cuanto a las velocidades del viento los rangos se mantuvieron entre 6 a 10 m/s., con un 57 %, seguido de velocidades menores, oscilando éstas en un rango de 3-5 m/s, con un 40 %; mientras que los porcentajes más bajos (3%), corresponden a las velocidades más altas registradas con 11-15 m/s (ANEXO 3, Tabla 3c).

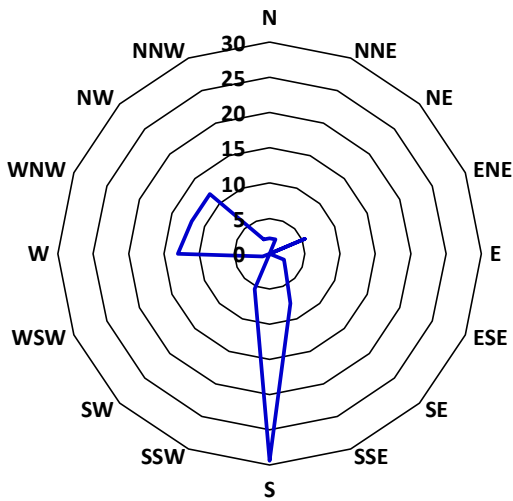
Por último, durante los meses de septiembre, octubre y diciembre la procedencia de los vientos predominó en dirección S, cuyo porcentaje de datos es del 30 %; seguida de una dirección secundaria que va de W-WNW-NW, con porcentajes de 13.3%, 21.1% y 12.2% respectivamente (Figura 10). Los vientos durante este periodo presentan rangos entre 6-10 m/s, con un 46 %, seguidos de los de 2-5 m/s, con un porcentaje de 44%, seguidos de velocidades entre 11-15, y > 16 m/s, con un porcentaje de 8% y 2%, respectivamente (ANEXO 3, Tabla 3d).



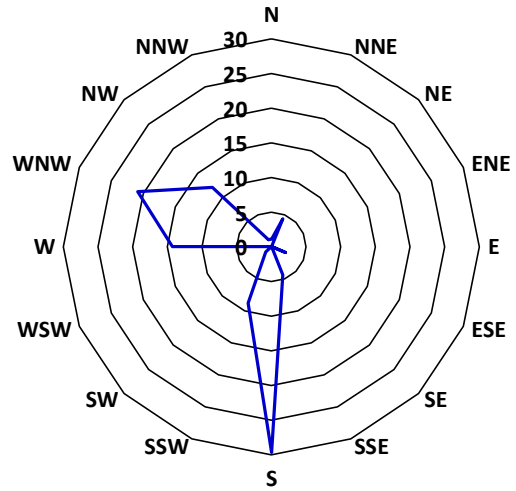
Trimestre 1 (enero, febrero, marzo).



Trimestre 2 (abril, mayo, junio).



Trimestre 3 (julio, agosto, septiembre).



Trimestre 4 (octubre, noviembre, diciembre).

Figura 10. Direcciones de procedencia de los vientos en los 4 trimestres del año (2018).

7.1.4 Distribución de días con calidad del aire buena, regular y mala con respecto de $PM_{2.5}$

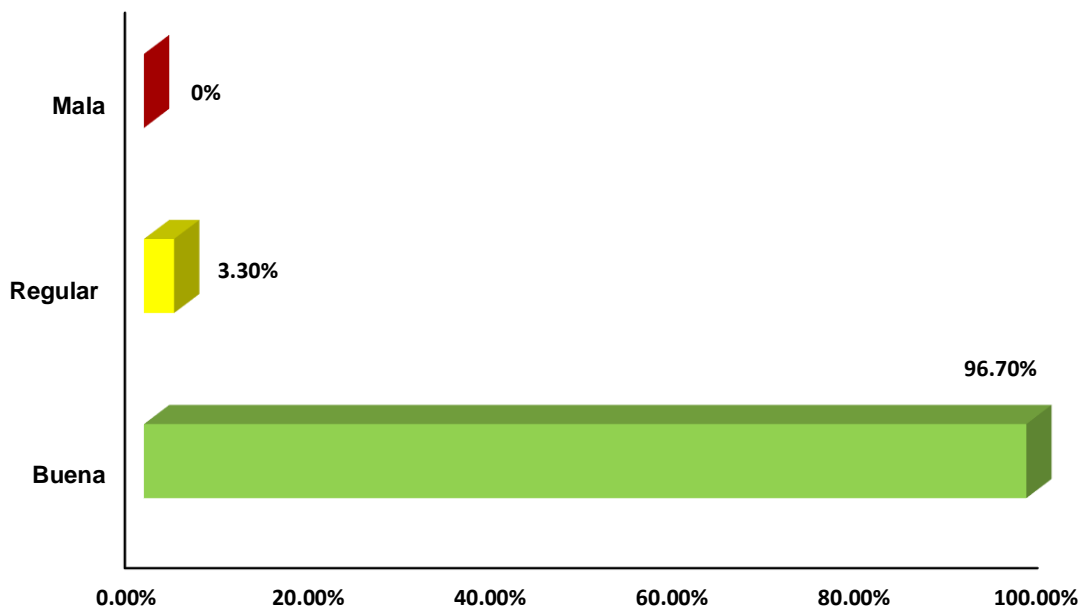
En la Tabla 6 se presentan el número de días con buena, regular y mala calidad del aire de acuerdo al criterio de SEMARNAT (2014), donde se establece la calidad del aire de acuerdo a los siguientes puntos:

- Días con calidad del aire buena: el dato diario obtenido se ubica entre cero y la mitad del límite establecido ($45 \mu\text{g}/\text{m}^3$) establecido en la NOM-025-SSA1-2014 (DOF, 2014).
- Días con calidad del aire regular: el dato diario obtenido se ubica entre la mitad del límite permisible establecido ($45 \mu\text{g}/\text{m}^3$) establecido en la NOM-025-SSA1-2014 (DOF, 2014) y el límite mismo.
- Días con mala calidad del aire: el dato diario obtenido rebasa el límite permisible establecido ($45 \mu\text{g}/\text{m}^3$) establecido en la NOM-025-SSA1-2014 (DOF, 2014).

En la Figura 11 se muestra un comparativo de los porcentajes que representan esos días respecto al total de días muestreados en la ciudad. Aunque la ciudad de Cananea, Sonora, se caracteriza por ser una zona de actividad industrial minera y donde se pueden apreciar vías sin pavimentar y tráfico sobre ellas que podrían inducir a la presencia de polvos en el aire conformado por partículas finas resuspendidas, es preciso señalar que 59 de los 61 días muestreados presentaron una buena calidad del aire (Tabla 6) representando un 96.7 % del total de muestras válidas tomadas durante el año 2018 (Figura 11). De manera satisfactoria ningún día presentó una mala calidad de calidad del aire respecto a $PM_{2.5}$ que pudiera representar una amenaza para la salud de la población.

Tabla 6. Días con buena, regular y mala calidad del aire respecto a $PM_{2.5}$ en la ciudad de Cananea, Sonora, México durante el año 2018.

Ciudad	Total de días muestreados	Días con buena calidad de aire	Días con regular calidad del aire	Días con mala calidad del aire
Cananea	61	59	2	0

**Figura 11.** Porcentaje de días con buena, regular y mala calidad del aire respecto a $PM_{2.5}$ en la ciudad de Cananea, Sonora, México durante el año 2018.

De manera particular, haciendo un análisis trimestral es conveniente mencionar que los trimestres 2 y 3 presentaron un total de días con buena calidad del aire, mientras que los trimestres 1 y 4, apenas y presentaron un día con regular calidad del aire (Figura 12). En virtud de los resultados obtenidos, se puede decir que la presencia de material particulado en la ciudad de Cananea, Sonora, durante los cuatro trimestres del año 2018 no significó motivo tal que representará algún peligro para el bienestar de la salud de los habitantes de esta ciudad.

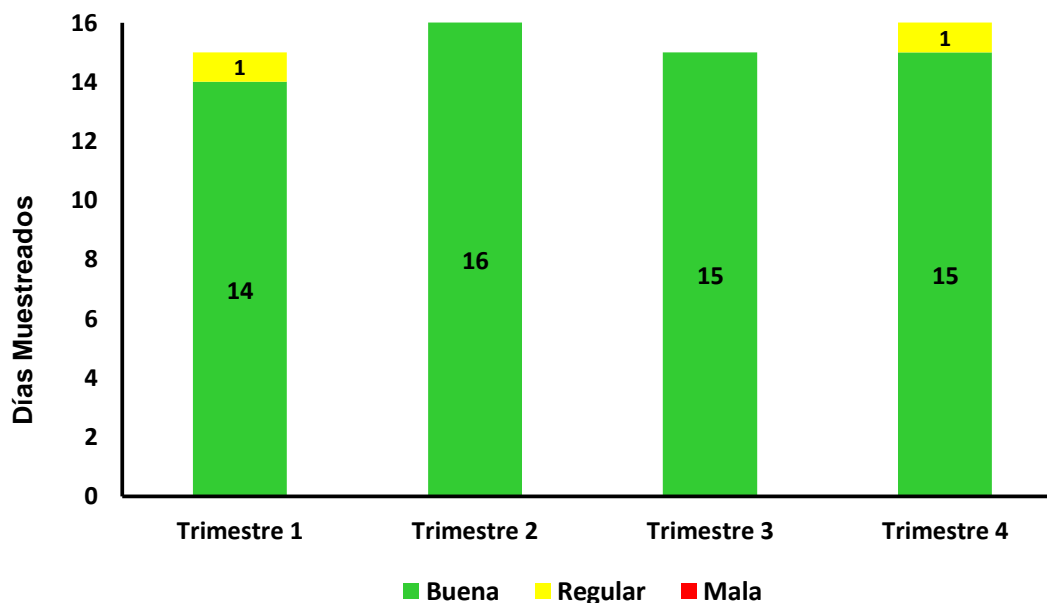


Figura 12. Días de Buena, Regular y Mala Calidad del Aire por Trimestre

7.2 Metales (Cd, Cu, Pb) y Metaloides (As, Si)

7.2.1 Cadmio

En México no existe una norma sobre calidad del aire para este metal. La Organización Mundial de la Salud (WHO, 2005), determina un valor máximo permisible para cadmio de $0.005 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio en 24 horas. Cabe señalar, que en el presente estudio el cadmio se encontró por abajo del límite de detección de la técnica analítica ($\text{LD} = 0.006 \mu\text{g}/\text{m}^3$) durante los 4 trimestres del año (Figura 13, ANEXO 2, Tablas 2a - 2d). Es importante mencionar que las principales causas de la presencia de cadmio en el aire ambiente se deben a la extracción y refinación de metales, así como también a la combustión de combustibles fósiles y a la disposición e incineración de basura. Este metal puede ser transportado a largas distancias en la atmósfera en forma de partículas o vapores proveniente de procesos de alta temperatura (ATSDR, 2016). Por lo anterior, se recomienda seguir monitoreando este metal para estudiar su comportamiento.

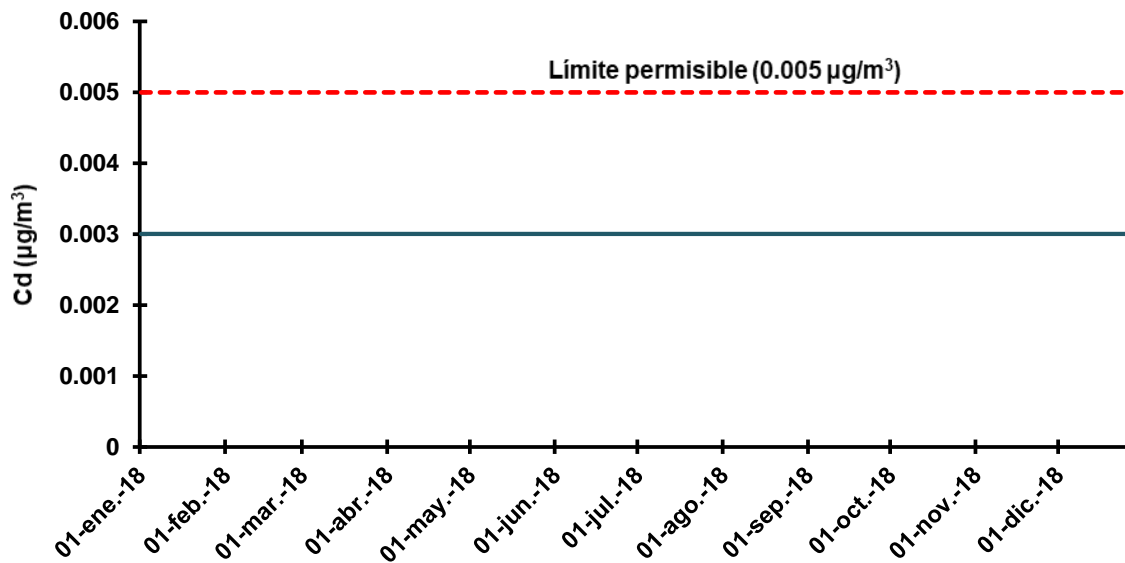


Figura 13. Distribución de la concentración de Cd ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en aire ambiente en la ciudad de Cananea, Sonora, durante el año 2018

7.2.2 Cobre

Para este elemento, no existe un referente de exposición permisible en aire ambiente en México. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de Norteamérica (EPA, 2010), fija un valor máximo permisible de cobre en aire de $0.290 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el trimestre de julio a septiembre, específicamente el día 22 de septiembre del 2018, se observó un valor máximo de $0.041 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que, en el trimestre de abril a junio, concretamente el día 13 de abril, se presentó un valor mínimo de $0.005 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 14, ANEXO 2, Tablas 2b). Por lo tanto, los resultados de cobre obtenidos durante el año de estudio no rebasan el valor normado, por lo que se asume que en el período de investigación no existió peligro a la salud de la población. Sin embargo, es imprescindible recalcar que la ciudad de Cananea, Sonora, es el centro minero más importante del país, por lo que se aconseja seguir analizando el comportamiento de este metal, ya que una de las principales actividades humanas que elevan la abundancia de este elemento en el ambiente son la minería, fundición y los procesos industriales.

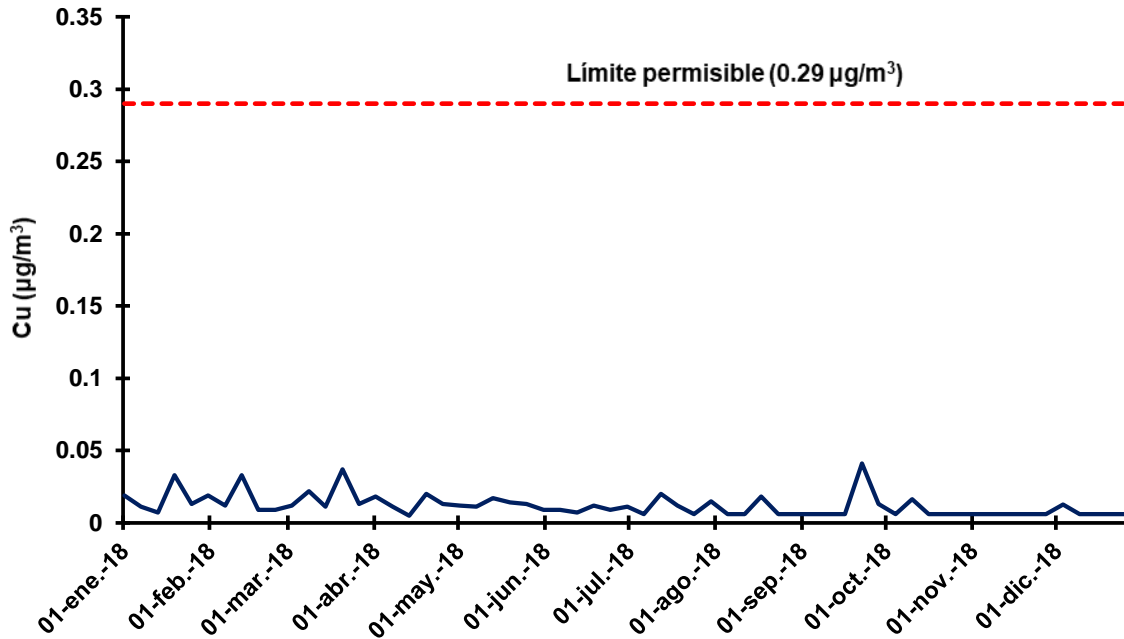


Figura 14. Distribución de la concentración de Cu ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en aire ambiente en la ciudad de Cananea, Sonora, durante el año 2018

7.2.3 Plomo

En la presente investigación se tomaron en cuenta los estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiente de la India (CPCB, 2009) que establecen un valor máximo permisible de plomo de $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio en 24 horas. Sin embargo, durante los cuatro trimestres del periodo de estudio, los resultados obtenidos para este metal se encontraron abajo del límite de detección de la técnica de análisis ($\text{LD} = 0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Figura 15, ANEXO 2, Tabla 2a – 2d), por lo que se puede considerar que estas concentraciones no resultan dañinas para la salud de la población ni que afecten el medio ambiente de la región.

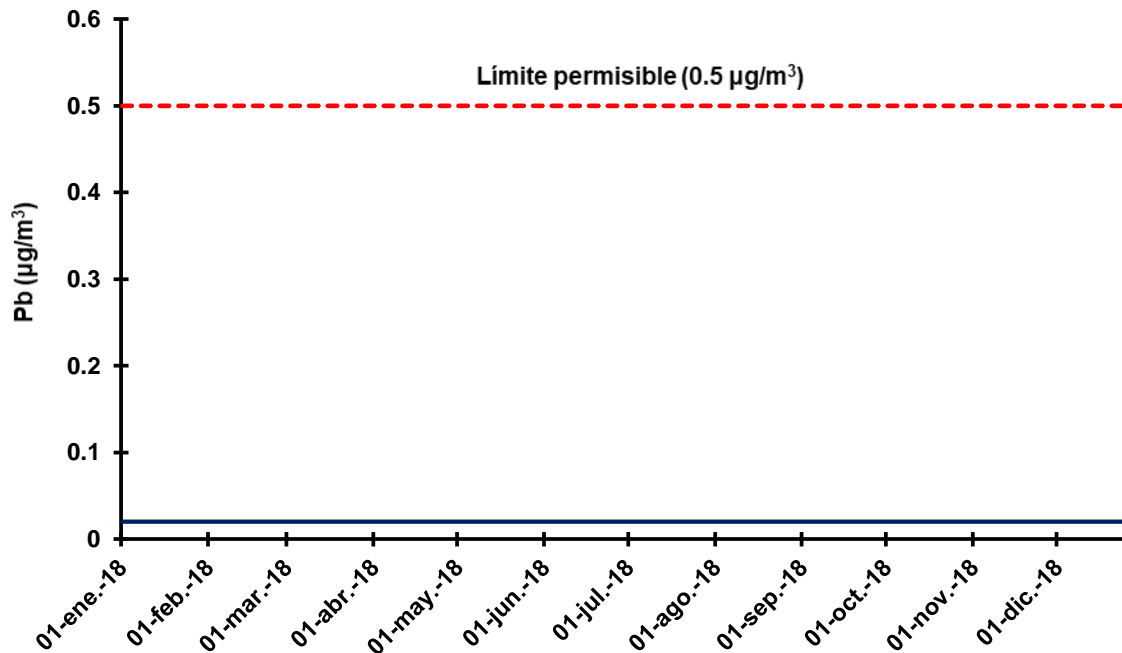


Figura 15. Distribución de la concentración de Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en aire ambiente en la ciudad de Cananea, Sonora, durante el año 2018.

7.2.4 Arsénico

Para este metal no existe un límite de concentración máxima en aire establecido por la Normatividad Mexicana, por lo que para este proyecto se optó por utilizar los estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiente de la India (CPCB, 2009) que establecen un valor máximo permisible de $0.006 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio en 24 horas. Cabe mencionar, que las concentraciones de arsénico que se detectaron estuvieron por abajo del límite de detección ($\text{LD} = 0.002 \mu\text{g}/\text{m}^3$) durante los 4 trimestres del año excepto el día 19 de enero se presentó un valor de $0.004 \mu\text{g}/\text{m}^3$, no obstante, este se posiciona muy por abajo del valor máximo permisible, asumiéndose así que este metaloide no representó un peligro para la salud de las personas que habitan la entidad (Figura 16, ANEXO 2, Tablas 2a - 2d). Como dato importante es conveniente indicar que a pesar de que el arsénico es liberado al ambiente de manera natural por la erosión de depósitos minerales, también es posible que se encuentre en el aire a causa de la quema de combustibles fósiles y la minería.

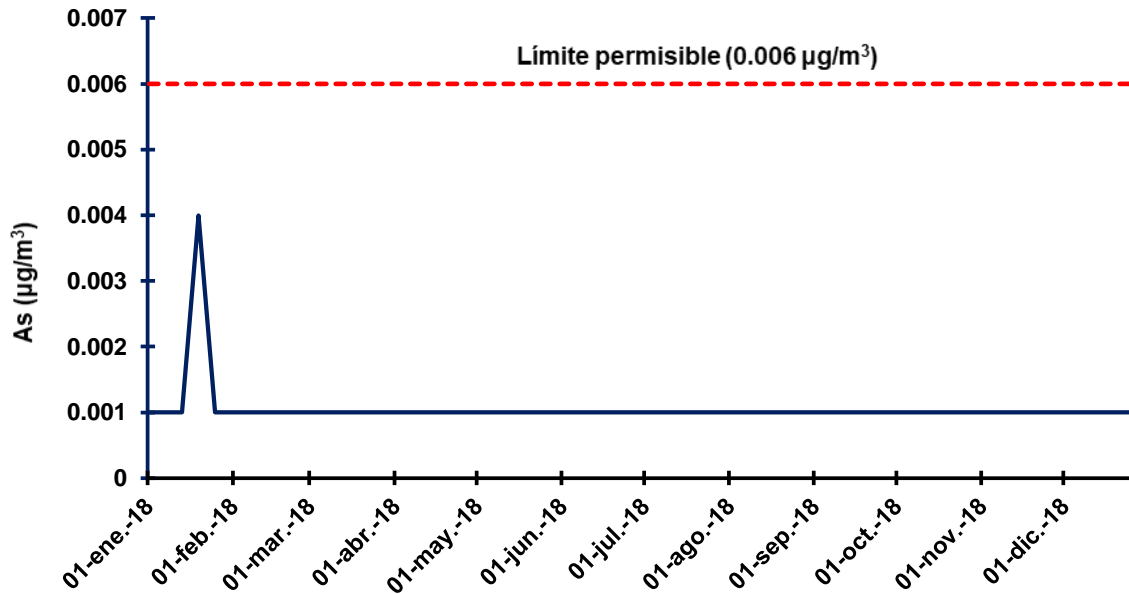


Figura 16. Distribución de la concentración de As ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en aire ambiente en la ciudad de Cananea, Sonora, durante el año 2018.

7.2.5 Silicio

Para el silicio no existe regulación en México que establezca un límite máximo de concentración en el aire ambiente. La Organización Internacional de Normalización (ISO, 1995), propone un límite máximo permisible de $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el trimestre de enero a marzo, específicamente el día 19 de enero, se observó un valor máximo de $1.004 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en el día 24 de julio se registró una concentración mínima de $0.121 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 17, ANEXO 2, Tablas 2a - 2d). Las concentraciones detectadas se encuentran muy por abajo del límite permisible establecido, por lo que, este metaloide no representó un peligro para la salud de la población durante el ciclo anual 2018. Sin embargo, la presencia de silicio en el aire podría deberse a que es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre, encontrándose en forma de óxidos o silicatos, que pudieran verse alterados por la actividad minera de la región.

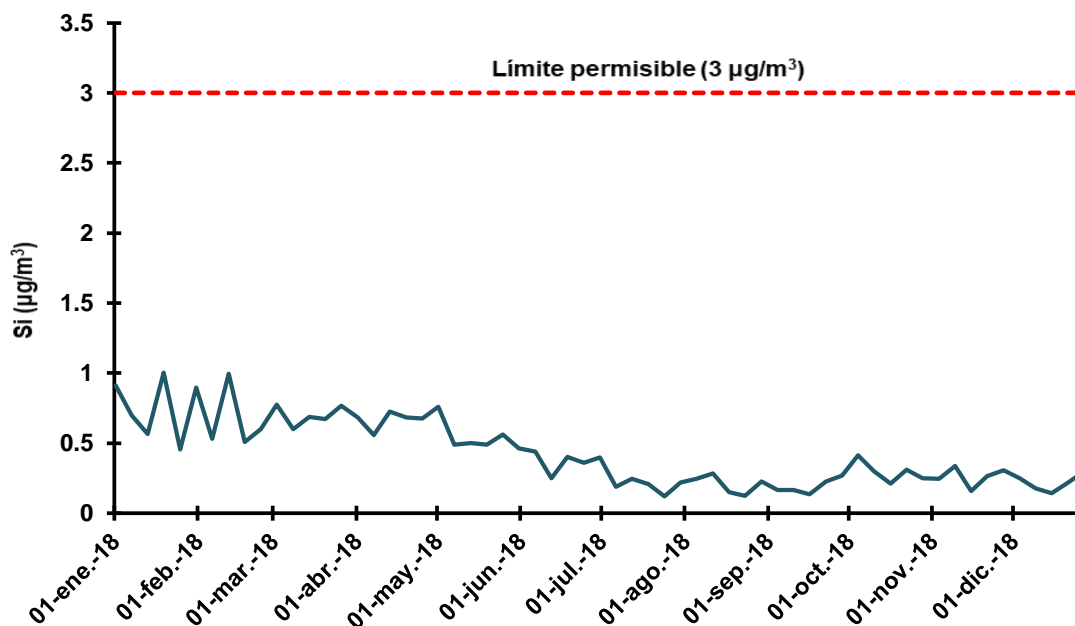


Figura 17. Distribución de concentración de Si ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en aire ambiente en la ciudad de Cananea, Sonora durante el año 2018.

7.3 Comportamiento temporal de $\text{PM}_{2.5}$, metales y metaloides

En lo que concierne al comportamiento temporal de los contaminantes de interés para esta investigación, se puede apreciar en la Tabla 7, que tanto el Cu como el Si presentaron una variabilidad significativa de acuerdo a la prueba estadística VW ($p < 0.05$). La prueba a posteriori demostró para el caso del Cu que las estaciones otoño e invierno fueron estadísticamente diferentes entre sí, observándose una media de 0.008 para el otoño y una media de 0.017 para el invierno.

Para el caso de Si la prueba VW ($p < 0.05$) también detectó diferencias significativas entre las estaciones del año, es decir la prueba a posteriori dejó en claro que las estaciones de primavera e invierno fueron estadísticamente diferentes a verano y otoño. En lo que respecta al comportamiento temporal de $\text{PM}_{2.5}$, Cd, Pb y As se puede decir que la prueba VW ($p < 0.05$) no mostró diferencias significativas entre las 4 estaciones del año. Esto significa que no se observaron diferencias significativas en la concentración en las estaciones primavera, verano, otoño e invierno.

Tabla 7. Variabilidad temporal de PM_{2.5}, metales y metaloides con respecto a las estaciones del año

Parámetro	Temporada del Año	Medias	Análisis de Medias (0.05)
			Grupos Homogéneos
PM _{2.5}	Primavera	9.267	*
	Verano	7.125	*
	Otoño	11.933	*
	Invierno	10.467	*
As	Primavera	0.001	*
	Verano	0.001	*
	Otoño	0.001	*
	Invierno	0.001	*
Pb	Primavera	0.020	*
	Verano	0.020	*
	Otoño	0.020	*
	Invierno	0.020	*
Cd	Primavera	0.003	*
	Verano	0.004	*
	Otoño	0.003	*
	Invierno	0.003	*
Si	Primavera	0.563	*
	Verano	0.216	+
	Otoño	0.256	+
	Invierno	0.679	*
Cu	Primavera	0.012	*
	Verano	0.011	*
	Otoño	0.008	+
	Invierno	0.017	*

(*) = No hay diferencia significativa

(+) = Si hay diferencia significativa entre las estaciones del año

7.3 Resultados del análisis estadístico en relación a la asociación de las concentraciones totales de PM_{2.5}, Metales y Metaloides, y parámetros climatológicos (precipitación, temperatura, humedad relativa).

Con el propósito de determinar la posible relación entre las variables involucradas en esta investigación, se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman como un indicador de asociación entre las concentraciones de los parámetros evaluados (PM_{2.5}, metales y metaloides), con respecto a los datos climatológicos (Guillen et al., 2014).

En el ANEXO 4 (Tabla 4a), se presentan los resultados de la correlación de Spearman producto del análisis de PM_{2.5}, metales, metaloides y parámetros climatológicos obtenidos en la ciudad de Cananea, Sonora. Únicamente se identificaron valores superiores a 0.5 de coeficiente de correlación ($\alpha = 0.05$) para la relación Cobre y Silicio ($r = 0.527$), Cobre y Silicio con la velocidad del viento ($r = 0.3$ y 0.61); así como una leve asociación de Cobre y Silicio con PM_{2.5} ($r = 0.24$ y 0.21).

Cabe hacer mención que, en una relación positiva, como es el caso anterior, la variación de este indicador puede ser de 0 a 1, entendiéndose que entre más cercano sea a la unidad más estrecha es la correlación de los pares de datos. Muy conveniente es atender este tipo de comportamientos debido a que en la medida de que aumenta uno disminuye de manera directa y estrecha el otro. Estas correlaciones deben considerarse de interés para futuras investigaciones, ya que existe poca información acerca del comportamiento de estos contaminantes en la región de Cananea, Sonora, proporcionando así los datos suficientes para realizar una investigación completa en un contexto particular, de manera que se puedan establecer afirmaciones o identificar variables que den un sentido de entendimiento del fenómeno al que hacen referencia. Por otro lado, es pertinente señalar que este análisis básico de correlación, no puede asegurar la situación causa-efecto.

7.4 Comparativo del promedio anual de PM_{2.5} en la ciudad de Cananea con respecto a otras regiones del país y del mundo.

En la Tabla 8 se presenta muestra un comparativo del promedio anual de PM_{2.5} en la ciudad de Cananera, Sonora, México con respecto a otras ciudades. Los promedios anuales que se presentan en la tabla son los reportados por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2016). Se puede apreciar claramente que todas las ciudades del país, excluyendo la región de Cananea, superan el valor de referencia promedio anual (12 µg/m³) (NOM-025-SSA-2014). Para el resto de las ciudades reportadas es de observarse que los países latinos, al igual que países como China e Irán, poseen ciudades cuya calidad es crítica, tal es el caso de Xingtai (China) con 128 µg/m³ y Zabol (Irán) con 217 µg/m³, estas concentraciones de material particulado pueden ser nocivos para la salud de la población expuesta de manera crónica. Incluso los países del primer mundo como Estados Unidos de Norteamérica, Canadá, Alemania y España, reportan en casos específicos de ciudades con valores fuera de norma.

Tabla 8. Promedio anual de PM_{2.5}, reportado para diferentes ciudades del país y del mundo (WHO, 2016).

País	Ciudad	Promedio Anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
México	Monterrey	36
	Toluca	33
	Salamanca	28
	León	27
	Irapuato	26
	Silao	24
	Cananea	9.7
Brasil	Sta. Gertrudes	44
	Madre de Deus	5
Chile	Coyhaique	64
	Punta Arenas	12
Costa Rica	Heredia	29
	Moravia	14
China	Xingtai	128
	Taitung	11
Irán	Zabol	217
	Arak	7
Canadá	Courtenay	17
	Auclair	3
USA	Visalia-Porterville, CA	18
	Sinclair, Carbon, WY	1.6
España	Aviles	18
	Noia	4
Alemania	Regensburg	19
	Wasserkuppe	7

7.5 Comparativo de Metales y Metaloides en la ciudad de Cananea con respecto a otras ciudades del país y del mundo.

En Tabla 9, se presenta la concentración promedio y máxima de los metales estudiados en aire ambiente ($PM_{2.5}$) en Cananea, Sonora en comparación con los metales en el aire ambiente estudiados en otras regiones del mundo. Para el caso del Arsénico se puede apreciar que el Norte de Francia y Perú exceden el límite permisible de $0.006 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con valores de $0.0072 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0.036 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Para el caso de cadmio se puede apreciar que las ciudades del Sur de California, Corea y Ciudad de México, rebasan el límite permisible de $0.005 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para cobre, la ciudad de Cananea registra un valor muy por abajo de los estándares internacionales para aire ambiente al igual que todas las ciudades reportadas. En relación al Plomo, en el presente estudio se reportan concentraciones no detectables, sin embargo, se registra un valor máximo de $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la ciudad de Agra, India, y $1.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la ciudad de Pamplona, Colombia. Respecto al Silicio el valor promedio de Silicio registrado fue de $0.425 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dicho valor se posiciona por abajo del límite permisible de $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y se observa que no se detectaron valores superiores al límite permisible en las ciudades presentadas en la Tabla 7

Tabla 9. Concentraciones promedio y máxima de metales ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) detectadas en diferentes ciudades del mundo

Lugar	Datos	As	Cd	Cu	Pb	Si	Referencias
Cananea, Sonora	Promedio	0.001	0.003	0.012	0.02	0.425	Este estudio
	Máxima	0.004	0.028	0.041	0.02	1.004	
Estados Unidos	Promedio anual	0.0017	0.00551	0.00398	0.00489	0.105	Bell <i>et al.</i> (2007)
Sur de California	Promedio mensual	0.006	0.043	0.075	0.039	0.939	Na y Cocker, (2009)
Norte de Francia	Máxima	0.0072	0.00332	0.0318	0.171	–	Ledoux <i>et al.</i> (2017)
Agra, India	Promedio (Zona urbana)	–	–	0.2	1.1	–	Kulshrestha <i>et al.</i> (2009)
Korea	Promedio	0.00232	0.0101	0.00447	0.0145	0.126	Han <i>et al.</i> (2015)
Chihuahua, México	Promedio anual	0.00262	–	0.00762	0.02579	–	Canseco-Lajas, (2013)
Pamplona, Colombia	Máxima	–	ND	–	1.02	–	Quijano <i>et al.</i> (2010)
Perú	Mediana	0.036	–	0.011	0.014	0.578	Pacsi y Llanos (2017)
Brazil	Promedio Anual	–	–	0.00442	0.00839	0.1253	Miranda <i>et al.</i> (2012)
Ciudad de México	Promedio 24hrs	0.01	0.01	0.05	0	0.57	Vega <i>et al.</i> (2004)

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES

- Los resultados del presente estudio se consideran válidos al cumplir con el criterio de cobertura establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014.
- Las concentraciones de $PM_{2.5}$ presentaron resultados que cumplen con la NOM-025-SSA1-2014 tanto para 24 horas ($12 \mu\text{g}/\text{m}^3$) como en el promedio anual ($12 \mu\text{g}/\text{m}^3$).
- Los resultados obtenidos indican que un 96.7% fueron días con buena calidad del aire y 3.3% con regular calidad del aire (SEMARNAT, 2014).
- Los niveles de concentración de Cu, Cd, Pb, As y Si se consideran satisfactorios. Los resultados obtenidos fueron inferiores a los valores máximos permisibles establecidos en las normas y criterios utilizados.
- La ciudad de Cananea, Sonora presenta concentraciones de $PM_{2.5}$, metales y metaloides muy por abajo de los estándares internacionales en comparación con otras ciudades de México y el mundo.
- En el presente estudio, únicamente se identificaron correlaciones positivas entre Cobre-Silicio ($r > 0.5$).

- La prueba de van der Waerden no mostró diferencias significativas entre las 4 estaciones del año para $PM_{2.5}$, Cd, Pb y As. Para Cu, se detectó diferencias muy marcadas con respecto a las estaciones otoño e invierno. Para Si, las estaciones de primavera e invierno fueron estadísticamente diferentes a verano y otoño.
- Se acepta la hipótesis de trabajo, la cual establece que la concentración de $PM_{2.5}$, metales (Cd, Cu, Pb) y metaloides (As, Si) en el aire ambiente de Cananea, Sonora, no rebasan los máximos permisibles establecidos en la normatividad mexicana e internacional.
- Se considera la Calidad del Aire como buena para la ciudad del Cananea, Sonora, durante el ciclo anual (2018).

CAPÍTULO 9

RECOMENDACIONES

- Continuar con el monitoreo periódico de $PM_{2.5}$, metales y metaloides, para evaluar su evolución y poder tomar acciones que permitan disminuir el peligro a la salud, por el fenómeno de la contaminación de aire.
- Considerar el estudio de otros metales como Hg, Ba, Be, Mo, V, Cr, entre otros; aniones como sulfatos, nitratos, nitritos, y compuestos orgánicos como hidrocarburos aromáticos policíclicos.
- Es conveniente la utilización de un software especializado que permita predecir el comportamiento espacial y temporal de los contaminantes presentes en el aire, de la región de Cananea, Sonora, México.
- Asimismo, se recomienda formular e instaurar programas de reforestación y pavimentación de calles, con la finalidad de disminuir las concentraciones diarias y anuales de $PM_{2.5}$ que se encuentran en el aire ambiente.
- Realizar estudios de tipo socio-culturales que permitan conocer las percepciones, opiniones, conocimientos y conductas de la población ante el fenómeno de contaminación del aire.

CAPÍTULO 10

BIBLIOGRAFÍA

ATSDR (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades), 2016. ToxFAQs™ - Cadmio (Cadmium). https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts5.html

Barceloux, D. 1999. Copper, *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology*, 37:2, 217-230, DOI: 10.1081/CLT-100102421

Barreto, C. 2011. Introducción a la estadística no paramétrica (parte II). Prueba de correlación de Spearman, (2).

Bell MI, Dominici F, Ebisu K, Zeger SI, & Samet Jm. 2007. Spatial and temporal variation in PM (2.5) chemical composition in the United States for health effects studies. *Environmental Health Perspectives*. 115, 989-95

Canseco-Lajas, A. 2013. Determinación de PM_{2.5} y metales en el aerosol urbano de la Cd. de Chihuahua, México., Chihuahua, México.

Choudhary, Dr. Mahendra & Garg, Vaibhaw. 2013. Causes, Consequences and Control of Air Pollution.

Clavijo, A. 2002. Fundamentos de la química analítica. Equilibrio iónico y análisis químico. Primera Edición. p.69. Preparación editorial e impresión Universidad Nacional de Colombia –UNILIBROS.

CPCB (Central Pollution Control Board), 2009. National Ambient Air Quality Standards, Central Pollution Control Board, Ministry of Environment & Forests, Government of India. http://cpcb.nic.in/National_Ambient_Air_Quality_Standards.php.

Csuros, M. y Csuros, M. 2002. Environmental sampling and analysis for metals. Lewis Publisher, .372 pp.

De La Rosa, J. 2008. Contaminación Atmosférica de Material Particulado Provocada por la Extracción Minera. Macla: Revista de La Sociedad Española de Mineralogía, 10, 85–88. Retrieved from http://www.ehu.eus/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_85.pdf

Diggle, P. & Chetwynd, A. 2013. Statistics and scientific method. An introduction for students and researchers. UK: Oxford University Press; 2013. p. 36-56.

DOF (Diario Oficial de la Federación), 2014. Diario Oficial de la Federación, Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud Ambiental. Valores límites permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el aire ambiente y criterios para su evaluación.

DOF (Diario Oficial de la Federación), 1993. Norma Oficial Mexicana NOM-035-SEMARNAT-1993, 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. 18 de octubre de 1993.

DOF (Diario Oficial de la Federación), 2005. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993, Criterios para evaluar el valor límite permisible para la concentración de material particulado. Valor límite permisible para la concentración de partículas suspendidas totales PST, partículas menores de 10 micrómetros PM_{10} y partículas menores de 2.5 micrómetros $PM_{2.5}$ de la calidad del aire ambiente.

DOF (Diario Oficial de la Federación), 2012. Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012. Establecimiento y operación de sistemas de operación de la calidad del aire. 16 de julio de 2012.

EPA (Environmental Protection Agency), 1992. Code of Federal Regulations. Title 40, Part 50 – 58. Environmental Protection Agency. USA.

EPA (Environmental Protection Agency), 1998. Environmental Protection Agency. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems. Volume II: Part 1. EPA-454/R-98-004.USA.

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.

Garrido A. & Camargo Y. (2012). Partículas respirables en el aire: generalidades y monitoreo en Latinoamérica. Revista INGE CUC, volumen 8 (número 1), 2012: 295-300

Gavett, S., Haykal-Coates, N., Copeland, L., Heinrich, J. & Gilmour, M. 2003. Metal composition of ambient PM_{2.5} influences severity of allergic airways disease in mice. *Environmental Health Perspectives*, 111(12), 1471–1477. <https://doi.org/10.1289/ehp.6300>

Guerrero, P. 2011. Rosa de los vientos. <https://geografia.laguia2000.com/general/rosa-de-los-vientos>.

Han, Y., Kim, H., Cho, S., Kim, P. & Kim, W. 2015. Metallic elements in PM_{2.5} in different functional areas of Korea: Concentrations and source identification. *Atmospheric Research*. 153, 416-428.

INAFED (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal), 2004. Sistema Nacional de Información Municipal. Secretaría de Gobernación, México.

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático), 2009. Metales pesados. www.inecc.gob.mx/publicaciones/gacetas/228/67.html

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático), 2016. Informe Nacional de Calidad del Aire.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2015. Censo General de Población y Vivienda. México 2015.

ISO (International Organization for Standardization), 1995. Air quality – Particle size fractionation definitions for health-related sampling. ISO No. 7708:1995. ISO, Geneva.

Jiménez, B.E. 2002. La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada. Grupo editorial LIMUSA, Colegio de ingenieros ambientales en México, A.C., Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA.

Kampa, M. & Castanas, E. 2008. Human Health Effects of Air Pollution. *Environmental Pollution*, 151, 362-367. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012>

Kulshrestha, A., Satsangi, P. G., Masih, J., & Taneja, A. 2009. Metal concentration of PM_{2.5} and PM₁₀ particles and seasonal variations in urban and rural environment of Agra, India. *Science of the Total Environment*. 407, 6196-620

Ledoux, F., Kfoury, A., Delmaire, G., Roussel, G., El Zein, A., & Courcot, D. 2017. Contributions of local and regional anthropogenic sources of metals in PM_{2.5} at an urban site in northern France. *Chemosphere*. 181, 713-724.

Lee, C., Li, X., Zhang, G., Li, J., Ding, A., & Wang, T. 2007. Heavy metals and Pb isotopic composition of aerosols in urban and suburban areas of Hong Kong and Guangzhou, South China-Evidence of the long-range transport of air contaminants. *Atmospheric Environment*, 41(2), 432–447. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.07.035>

Manahan, S. 2007. Introducción a la química ambiental. Editor Reverte, 2007. ISBN 84-291-7907-0 pág. 402

Mercado-Calderón, A. 2017. Metales y Metaloides Tóxicos y Salud en el Trabajo. <http://prevencionar.com.mx/2017/03/07/metales-metaloides-toxicos-salud-trabajo/>

Miller, J.C. y Miller, J.N. 1993. Estadística para Química Analítica. Editorial Addison-Wiley Iberoamericana, Wilmington, Delaware, U.S.A.

Miranda, R., Andrade, F., Fornaro, A., Astolfo, R., Andre, P. & Saldiva, P. 2012. Urban air pollution: a representative survey of PM_{2.5} mass concentrations in six Brazilian cities. *Air Quality Atmosphere and Health*. 5, 63-77.

Na, K., & Cocker, D. 2009. Characterization and source identification of trace elements in PM_{2.5} from Mira Loma, Southern California. *Atmospheric Research*. 93, 793-800.

NIST (National Institute of Standards and Technology), 2009. Statistical Engineering Division Dataplot. <http://www.itl.nist.gov/div898/software/dataplot/refman1/auxillar/vanderwa.htm>.

Norma Oficial Mexicana (NMX. AA_115-SCFI-2001). Análisis de agua-criterios para el control de la calidad de resultados analíticos. Secretaría de Economía, México, D.F. 31 p

Norma Oficial Mexicana (NMX_AA_051-SCFI-2001). Análisis de agua-determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas-método de prueba. Secretaría de Economía, México, D.F. 46p.

OMS (Organización Mundial de la Salud), 2018. Calidad del aire y salud. [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).

Pacsi-Valdivia, S., and Llanos-Puga, C. 2017. Evaluación de la composición química del material particulado PM_{2.5} en la Universidad Nacional Agraria La Molina., Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú. 78 (2): 210-215 DOI: <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v78i2.1058>.

Pita-Fernández, S., Pértega-Díaz, S. 2001. Unidad de Epidemiología Clínica y Bioestadística. Utilización e Interpretación de las Técnicas de Correlación disponible. Complejo Hospitalario Juan Canalejo. A Coruña (España):*Cad Aten Primaria*; 1997;4: 141-144. [Actualizado: 30/03/2001].

Prol-Ledesma, R., Siebe, C. & Ramos-Arroyo, Y. 2004. Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato, México: Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros. Universidad Nacional Autónoma de México: Instituto de Geología.

Quijano, A., Quijano, M., & Henao, J. 2010. Caracterización fisicoquímica del material particulado fracción respirable PM_{2.5} en Pamplona-Norte de Santander-Colombia. Universidad de Pamplona. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90315226007>.

Ramos, S., Bautista, R., & Valdez-Manzanilla, A. 2010. Estudio estadístico de la correlación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en la zona norte de Chiapas, México. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Richard, O. 1987. *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. Van Nostrand Reinhold, New York, U.S.A. 321 p.

Sánchez, E., Ortiz, M. & Castrejón, M. 2014. Contaminación urbana del aire: Aspectos fisicoquímicos, microbiológicos y sociales. Universidad Autónoma de Morelos, 186 p.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), 2005. Guía de Elaboración y Usos de Inventarios de Emisiones. SEMARNAT, INE, Western Governor's Association. Primera edición, mayo 2005, México.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), 2013. Calidad del aire: una práctica de vida. Primera edición 2013.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales), 2014. Calidad del aire en la Ciudad de México: Informe 2014.

Sonnad S. 2002. Describing data: Statistical and graphical methods. *Radiology*. 2002;225 (3):622-628.

Toscana-Aparicio, A., & Canales-Hernández, P. 2017. Gestión de riesgos y desastres socioambientales. El caso de la mina Buenavista del cobre de Cananea. *Investigaciones Geográficas*, 0(93). doi:<http://dx.doi.org/10.14350/rig.54770>

Ubilla, C. & Yohannessen, K. 2017. Contaminación Atmosférica Efectos en la Salud Respiratoria en el Niño, *Revista Médica Clínica Las Condes*, Volumen 28, Issue 1, Pages 111-118, ISSN 0716-8640, <https://doi.org/10.1016/j.rmcl.2016.12.003>.

Vega, E., Reyes, E., Ruiz, H., García, J., Sánchez, G., Martínez-Villa, G., González, U., Chow, J. & Watson, J. 2004. Analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ in the | of Mexico City during 2000-2002. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 54, 786-798.

WHO (World Health Organization), 2000a. Air Quality Guidelines. Second Edition. Regional Office for Europe. Copenhagen, Denmark.

WHO (World Health Organization), 2000b. Quantification of the Health Effects of Exposure to Air Pollution. Report EUR/01/5026342 E74256.

WHO (World Health Organization), 2005. Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide, Global update 2005. http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/en/

WHO (World Health Organization), 2005. Guías de la OMS sobre la calidad del aire - actualización mundial 2005.

WHO (World Health Organization), 2018. Intoxicación por plomo y salud. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>

WHO (World Health Organization), 2018. Arsénico. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>

www.lenntech.es/periodica/elementos/si.htm

CAPÍTULO 11

ANEXOS

1. Resultados del Control de Calidad durante el Análisis de Metales en Filtros.
2. Resultados de concentración de $PM_{2.5}$, metales (Pb, Cu y Cd) y metaloides (As y Si) en el aire ambiente de la Ciudad de Cananea, Sonora, durante los cuatro trimestres del año 2018.
3. Información trimestral de los parámetros climatológicos de la ciudad de Cananea, Sonora, durante el ciclo anual 2018.
4. Resultados del análisis estadístico en relación a la asociación de las concentraciones totales de $PM_{2.5}$, Metales y Metaloides.

ANEXO 1

Resultados del Control de Calidad durante el Análisis de Metales en Filtros.

Tabla 1a. Resultados del análisis de Metales y Metaloides ($\mu\text{g/mL}$) realizados en los blancos de digestión (filtros), en los muestreos realizados (Enero - Junio 2018).

Blancos	As*	Si *	Pb	Cu	Cd
Blanco 1	ND (<LD)	0.15	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
Blanco 2	ND (<LD)	0.15	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (< LD)
Blanco 3	ND (<LD)	0.15	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
LD (**)	0.002	0.002	0.04	0.012	0.006

* = *Metaloides*

** = *Límite de Detección*

ND = *No detectable*

Tabla 1b. Resultados del análisis de Metales y Metaloides ($\mu\text{g/mL}$) realizados en los blancos de digestión (filtros), en los muestreos realizados (Julio - Diciembre 2018).

Blancos	As*	Si *	Pb	Cu	Cd
Blanco 1	ND (<LD)	-	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
Blanco 2	ND (<LD)	0.287	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (< LD)
Blanco 3	ND (<LD)	0.24	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
LD (**)	0.002	0.002	0.04	0.012	0.006

* = *Metaloides*

** = *Límite de Detección*

ND = *No detectable*

Tabla 1c. Parámetros de calidad utilizados en la Calibración del Equipo de Absorción Atómica AAnalyst 400 (Enero - Junio 2018).

Metal/Metaloide*	Curvas de calibración (Rango analítico)	Límite de Detección (LD) ($\mu\text{g/mL}$)	Límite de Detección (LD) ($\mu\text{g/m}^3$)	Coefficiente de Correlación (r)
As*	0.05, 0.10, 0.20, 0.50, 1.0	0.003	0.002	0.9999
Si*	0.10, 0.50, 1.00, 5.00	0.003	0.002	0.9999
Pb	0.50, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	0.06	0.04	0.9994
Cu	0.50, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	0.02	0.012	0.9999
Cd	0.50, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	0.01	0.006	1

* = Metaloide

Tabla 1d. Parámetros de calidad utilizados en la Calibración del Equipo de Absorción Atómica AAnalyst 400 (Julio - Diciembre 2018).

Metal/Metaloide*	Curvas de calibración (Rango analítico)	Límite de Detección (LD) ($\mu\text{g/ml}$)	Límite de Detección (LD) ($\mu\text{g/m}^3$)	Coefficiente de Correlación (r)
As*	0.05, 0.10, 0.20, 0.50, 1.0	0.003	0.002	0.9999
Si*	0.10, 0.50, 1.00, 5.00	0.003	0.002	0.9999
Pb	0.50, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	0.06	0.04	0.9999
Cu	0.50, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	0.02	0.013	0.9998
Cd	0.50, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0	0.01	0.006	0.9999

* = Metaloide

Tabla 1e. Resultados de muestras fortificadas con metales a tres niveles de concentración (0.50, 1.00 y 2.00 µg/mL) en los muestreos realizados (Enero -Junio 2018).

Metal	Concentración µg/mL	Recuperación (%)	Concentración µg/mL	Recuperación (%)	Concentración µg/mL	Recuperación (%)
As*	0.5	93.6	1	91.4	2	91.75
Si*	0.5	90.8	1	99	2	103.5
Pb	0.5	99.31	1	96.39	2	97.23
Cu	0.5	97.27	1	97.94	2	98.05
Cd	0.5	101.07	1	100.93	2	98.25

* = *Metales*

Tabla 1f. Resultados de muestras fortificadas con metales a tres niveles de concentración (0.50, 1.00 y 2.00 µg/mL) en los muestreos realizados (Julio - Diciembre 2018).

Metal	Concentración µg/mL	Recuperación (%)	Concentración µg/mL	Recuperación (%)	Concentración µg/mL	Recuperación (%)
As*	0.5	99.3	1	102	2	101.5
Si*	0.5	--	1	105.1	2	100.3
Pb	0.5	103.31	1	105.47	2	102.08
Cu	0.5	95.87	1	96.33	2	97.85
Cd	0.5	99.2	1	101.47	2	100.6

* = *Metales*

Tabla 1g. Control de calidad en las muestras duplicadas (Porcentaje de Desviación Porcentual Relativa DPR, %) en los muestreos realizados (Enero - Junio 2018).

Metal/ Metaloides	Muestra A	Muestra B (Duplicado)	DPR %	Muestra A	Muestra B (Duplicado)	DPR %
Enero-Marzo 2018						
As*	ND(<LD)	ND(<LD)	**	ND<LD	ND<LD	**
Cd	ND(<LD)	ND(<LD)	**	ND<LD	ND<LD	**
Cu	0.0192	0.0185	3.71	0.018	0.019	5.04
Pb	ND(<LD)	ND(<LD)	**	ND<LD	ND<LD	**
Si*	0.876	0.944	7.47	0.912	0.878	3.8
Abril-Mayo 2018						
As*	ND<LD	ND<LD	**	ND<LD	ND<LD	**
Cd	ND<LD	ND<LD	**	ND<LD	ND<LD	**
Cu	0.013	0.012	8	0.013	0.015	14.29
Pb	ND<LD	ND<LD	**	ND<LD	ND<LD	**
Si*	0.639	0.715	11.23	0.473	0.506	6.74

* = Metaloides

** = Los resultados obtenidos de DPR son idénticos.

Tabla 1h. Control de calidad en las muestras duplicadas (Porcentaje de Desviación Porcentual Relativa DPR, %) en los muestreos realizados (Julio – Diciembre 2018).

Metal/ Metaloides	Muestra A	Muestra B (Duplicado)	DPR %	Muestra A	Muestra B (Duplicado)	DPR %
Julio-Septiembre 2018						
As*	ND (<LD)	ND (<LD)	**	ND (<LD)	ND (<LD)	**
Cd	ND (<LD)	ND (<LD)	**	ND (<LD)	ND (<LD)	**
Cu	0.02	0.02	**	0.012	0.013	8
Pb	ND (<LD)	ND (<LD)	**	ND (<LD)	ND (<LD)	**
Si*	0.246	0.241	2.05	0.266	0.269	1.12
Octubre-Diciembre 2018						
As*	ND (<LD)	ND (<LD)	**	ND (<LD)	ND (<LD)	**
Cd	ND (<LD)	ND (<LD)	**	ND (<LD)	ND (<LD)	**
Cu	ND (<LD)	ND (<LD)	**	ND (<LD)	ND (<LD)	**
Pb	ND (<LD)	ND (<LD)	**	ND (<LD)	ND (<LD)	**
Si*	0.244	0.246	0.82	0.217	0.218	0.46

* = Metaloides

** = Los resultados obtenidos de DPR son idénticos

Tabla 1i. Resultados de Precisión (Repetibilidad) a partir de estándares de alta pureza, analizados por la técnica de absorción atómica en los muestreos realizados (Enero-Junio 2018).

Metal/ Metaloide	Concentración ($\mu\text{g/mL}$)	$\bar{X} \pm \text{DS}$	Concentración ($\mu\text{g/mL}$)	$\bar{X} \pm \text{DS}$	Concentración ($\mu\text{g/mL}$)	$\bar{X} \pm \text{DS}$
As*	0.5	0.468 \pm 0.014	1	0.914 \pm 0.007	2	1.835 \pm 0.035
Si*	0.5	0.454 \pm 0.003	1	0.990 \pm 0.014	2	2.070 \pm 0.028
Pb	0.5	0.478 \pm 0.032	1	0.964 \pm 0.039	2	1.944 \pm 0.064
Cu	0.5	0.494 \pm 0.006	1	0.979 \pm 0.017	2	1.961 \pm 0.018
Cd	0.5	0.505 \pm 0.007	1	1.00 \pm 0.009	2	1.965 \pm 0.011

* = Metaloide

\bar{X} = Promedio

DS = Desviación estándar

Tabla 1j. Resultados de Precisión (Repetibilidad) a partir de estándares de alta pureza, analizados por la técnica de absorción atómica en los muestreos realizados (Julio - Diciembre 2018).

Metal/ Metaloides	Concentración ($\mu\text{g/mL}$)	$\bar{X} \pm \text{DS}$	Concentración ($\mu\text{g/mL}$)	$\bar{X} \pm \text{DS}$	Concentración ($\mu\text{g/mL}$)	$\bar{X} \pm \text{DS}$
As*	0.5	0.497 \pm 0.002	1	1.02 \pm 0.014	2	2.03 \pm 0.000
Si*	0.5	-----	1	1.051 \pm 0.013	2	2.00 \pm 0.071
Pb	0.5	0.516 \pm 0.031	1	1.06 \pm 0.031	2	2.04 \pm 0.054
Cu	0.5	0.479 \pm 0.011	1	0.96 \pm 0.012	2	1.96 \pm 0.020
Cd	0.5	0.496 \pm 0.009	1	1.01 \pm 0.005	2	2.01 \pm 0.040

* = Metaloides

\bar{X} = Promedio

DS = Desviación estándar

ANEXO 2

Resultados de concentración de $PM_{2.5}$, metales (Pb, Cu y Cd) y metaloides (As y Si) en el aire ambiente de la Ciudad de Cananea, Sonora, durante los cuatro trimestres del año 2018.

Tabla 2a. Concentración de metales y metaloides ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en $\text{PM}_{2.5}$ en el aire ambiente de la ciudad de Cananea, Sonora, durante el trimestre enero-marzo de 2018.

Fecha de muestreo	$\text{PM}_{2.5}$	As*	Si*	Pb	Cu	Cd
01-ene-18	16	ND (<LD)	0.91	ND (<LD)	0.0188	ND (<LD)
07-ene-18	12	ND (<LD)	0.698	ND (<LD)	0.011	ND (<LD)
13-ene-18	7	ND (<LD)	0.565	ND (<LD)	0.007	ND (<LD)
19-ene-18	17	0.004	1.004	ND (<LD)	0.033	ND (<LD)
25-ene-18	10	ND (<LD)	0.456	ND (<LD)	0.013	ND (<LD)
31-ene-18	15	ND (<LD)	0.895	ND (<LD)	0.019	ND (<LD)
06-feb-18	7	ND (<LD)	0.531	ND (<LD)	0.012	ND (<LD)
12-feb-18	24	ND (<LD)	0.997	ND (<LD)	0.033	ND (<LD)
18-feb-18	7	ND (<LD)	0.507	ND (<LD)	0.009	ND (<LD)
24-feb-18	3	ND (<LD)	0.598	ND (<LD)	0.009	ND (<LD)
02-mar-18	12	ND (<LD)	0.776	ND (<LD)	0.012	ND (<LD)
08-mar-18	6	ND (<LD)	0.6	ND (<LD)	0.022	ND (<LD)
14-mar-18	10	ND (<LD)	0.686	ND (<LD)	0.011	ND (<LD)
20-mar-18	3	ND (<LD)	0.671	ND (<LD)	0.037	ND (<LD)
26-mar-18	9	ND (<LD)	0.766	ND (<LD)	0.013	ND (<LD)

* = Metaloides

ND = No Detectable.

LD = Límite de Detección.

Tabla 2b. Concentración de metales y metaloides ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en $\text{PM}_{2.5}$ en el aire ambiente de la ciudad de Cananea, Sonora, durante el trimestre abril-junio de 2018.

Fecha de muestreo	$\text{PM}_{2.5}$	As*	Si*	Pb	Cu	Cd
01-abr-18	5	ND (<LD)	0.684	ND (<LD)	0.018	ND (<LD)
07-abr-18	9	ND (<LD)	0.556	ND (<LD)	0.011	ND (<LD)
13-abr-18	7	ND (<LD)	0.724	ND (<LD)	0.005	ND (<LD)
19-abr-18	20	ND (<LD)	0.683	ND (<LD)	0.02	ND (<LD)
25-abr-18	5	ND (<LD)	0.677	ND (<LD)	0.013	ND (<LD)
01-may-18	14	ND (<LD)	0.761	ND (<LD)	0.012	ND (<LD)
07-may-18	15	ND (<LD)	0.488	ND (<LD)	0.011	ND (<LD)
13-may-18	6	ND (<LD)	0.499	ND (<LD)	0.017	ND (<LD)
19-may-18	6	ND (<LD)	0.489	ND (<LD)	0.014	ND (<LD)
25-may-18	12	ND (<LD)	0.562	ND (<LD)	0.013	ND (<LD)
31-may-18	6	ND (<LD)	0.461	ND (<LD)	0.009	ND (<LD)
06-jun-18	12	ND (<LD)	0.441	ND (<LD)	0.009	ND (<LD)
12-jun-18	8	ND (<LD)	0.248	ND (<LD)	0.007	ND (<LD)
18-jun-18	5	ND (<LD)	0.402	ND (<LD)	0.012	ND (<LD)
24-jun-18	2	ND (<LD)	0.359	ND (<LD)	0.009	ND (<LD)
30-jun-18	6	ND (<LD)	0.397	ND (<LD)	0.011	ND (<LD)

* = Metaloides

ND = No Detectable.

LD = Límite de Detección.

Tabla 2c. Concentración de metales y metaloides ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en $\text{PM}_{2.5}$ en el aire ambiente de la ciudad de Cananea, Sonora, durante el trimestre julio-septiembre de 2018.

Fecha de muestreo	$\text{PM}_{2.5}$	As*	Si*	Pb	Cu	Cd
06-jul-18	12	ND (<LD)	0.188	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
12-jul-18	11	ND (<LD)	0.244	ND (<LD)	0.02	ND (<LD)
18-jul-18	8	ND (<LD)	0.206	ND (<LD)	0.012	ND (<LD)
24-jul-18	8	ND (<LD)	0.121	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
30-jul-18	8	ND (<LD)	0.219	ND (<LD)	0.015	ND (<LD)
05-ago-18	8	ND (<LD)	0.247	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
11-ago-18	5	ND (<LD)	0.284	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
17-ago-18	9	ND (<LD)	0.15	ND (<LD)	0.018	ND (<LD)
23-ago-18	4	ND (<LD)	0.123	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
29-ago-18	13	ND (<LD)	0.225	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
04-sep-18	4	ND (<LD)	0.165	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
10-sep-18	6	ND (<LD)	0.167	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
16-sep-18	5	ND (<LD)	0.134	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
22-sep-18	5	ND (<LD)	0.227	ND (<LD)	0.041	ND (<LD)
28-sep-18	12	ND (<LD)	0.268	ND (<LD)	0.013	ND (<LD)

* = Metaloides

ND = No Detectable.

LD = Límite de Detección.

Tabla 2d. Concentración de metales y metaloides ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en $\text{PM}_{2.5}$ en el aire ambiente de la ciudad de Cananea, Sonora, durante el trimestre octubre-diciembre de 2018.

Fecha de muestreo	$\text{PM}_{2.5}$	As*	Si*	Pb	Cu	Cd
04-oct-18	2	ND (<LD)	0.411	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
10-oct-18	22	ND (<LD)	0.297	ND (<LD)	0.0162	ND (<LD)
16-oct-18	6	ND (<LD)	0.211	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
22-oct-18	7	ND (<LD)	0.311	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
28-oct-18	7	ND (<LD)	0.248	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
03-nov-18	7	ND (<LD)	0.245	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
09-nov-18	4	ND (<LD)	0.336	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
15-nov-18	13	ND (<LD)	0.158	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
21-nov-18	15	ND (<LD)	0.264	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
27-nov-18	15	ND (<LD)	0.306	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
03-dic-18	45	ND (<LD)	0.251	ND (<LD)	0.0127	ND (<LD)
09-dic-18	9	ND (<LD)	0.178	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
15-dic-18	2	ND (<LD)	0.143	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
21-dic-18	13	ND (<LD)	0.218	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)
27-dic-18	8	ND (<LD)	0.298	ND (<LD)	ND (<LD)	ND (<LD)

* = Metaloides

ND = No Detectable.

LD = Límite de Detección.

ANEXO 3

Información trimestral de los parámetros climatológicos de la ciudad de Cananea, Sonora durante el ciclo anual 2018.

Tabla 3a. Información climatológica del trimestre 1 (enero, febrero y marzo) del año 2018.

DÍA	VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)	DIRECCIÓN DEL VIENTO	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)	PRESIÓN BAROMÉTRICA (mmHg)	PRECIPITACIÓN (mm)
01/01/2018	12	NNW	14	24	764	0
07/01/2018	6	NW	15	36	762	0
13/01/2018	16	N	14	29	766	0
19/01/2018	9	SSW	14	25	762	0
25/01/2018	-	-	-	-	-	-
31/01/2018	6	NNW	17	15	761	0
06/02/2018	11	SW	15	25	761	0
12/02/2018	24	SSW	11	70	765	1
18/02/2018	16	SSW	12	81	760	7
24/02/2018	10	NNW	5	39	766	0
02/03/2018	9	SSW	14	28	763	0
08/03/2018	6	SW	17	16	760	0
14/03/2018	12	SSW	17	39	759	0
20/03/2018	11	N	15	17	761	0
26/03/2018	20	SSW	12	33	757	0

Tabla 3b. Información climatológica del trimestre 2 (abril, mayo y junio) del año 2018.

DÍA	VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)	DIRECCIÓN DEL VIENTO	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)	PRESIÓN BAROMÉTRICA (mmHg)	PRECIPITACIÓN (mm)
01/04/2018	10	WSW	19	18	758	0
07/04/2018	13	SW	20	25	757	0
13/04/2018	15	N	12	16	760	0
19/04/2018	20	SW	19	12	758	0
25/04/2018	12	WSW	23	15	759	0
01/05/2018	28	SSW	15	29	756	0
07/05/2018	11	W	26	19	758	0
13/05/2018	19	SW	20	31	758	0
19/05/2018	10	WSW	21	14	755	0
25/05/2018	9	SSW	25	16	758	0
31/05/2018	12	SW	25	17	755	0
06/06/2018	15	SW	27	31	754	0
12/06/2018	9	WNW	28	12	754	0
18/06/2018	10	WSW	24	34	757	0
24/06/2018	14	SW	25	46	756	0
30/06/2018	16	SSW	24	29	757	0

Tabla 3c. Información climatológica del trimestre 3 (julio, agosto y septiembre) del año 2018.

DÍA	VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)	DIRECCIÓN DEL VIENTO	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)	PRESIÓN BAROMÉTRICA (mmHg)	PRECIPITACIÓN (mm)
06/07/2018	11	ENE	29	29	756	0
12/07/2018	5	SSW	22	69	759	20
18/07/2018	6	S	23	67	759	0
24/07/2018	8	NW	30	30	755	0
30/07/2018	6	ENE	25	56	757	0
05/08/2018	7	NNW	27	53	754	4
11/08/2018	7	NW	21	77	758	9
17/08/2018	5	S	24	68	759	0
23/08/2018	5	WNW	20	82	759	9
29/08/2018	8	S	23	66	757	9
04/09/2018	4	SSW	22	70	757	17
10/09/2018	6	W	25	47	755	0
16/09/2018	6	W	25	47	755	0
22/09/2018	8	WNW	22	58	758	0
28/09/2018	5	S	24	43	755	0

Tabla 3d. Información climatológica del trimestre 4 (octubre, noviembre y diciembre) del año 2018.

DÍA	VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)	DIRECCIÓN DEL VIENTO	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)	PRESIÓN BAROMÉTRICA (mmHg)	PRECIPITACIÓN (mm)
04/10/2018	7	SSE	21	60	757	0
10/10/2018	7	S	15	55	758	0
16/10/2018	10	NW	10	83	761	3
22/10/2018	5	SSW	18	75	758	0
28/10/2018	5	W	20	41	761	0
03/11/2018	4	SW	16	38	759	0
09/11/2018	5	WNW	15	46	760	0
15/11/2018	7	WNW	10	25	765	0
21/11/2018	3	ESE	13	52	764	0
27/11/2018	5	NW	12	35	763	0
03/12/2018	2	WNW	8	60	765	0
09/12/2018	7	NW	10	63	768	0
15/12/2018	5	WNW	9	27	766	0
21/12/2018	5	S	16	21	761	0
27/12/2018	9	S	5	72	760	0

ANEXO 4

Resultados del análisis estadístico en relación a la asociación de las concentraciones totales de PM_{2.5}, Metales, Metaloides y Parámetros Climatológicos.

Tabla 4a. Resultados del análisis de correlación de Spearman entre metales, metaloides y parámetros climatológicos en la ciudad de Cananea, Sonora, durante el año 2018.

	PM _{2.5}	As	Si	Pb	Cu	Cd	Temperatura	Humedad Relativa	Presión Barométrica	Precipitación	Velocidad del viento
PM _{2.5}	1.00										
As	0.19	1.00									
Si	0.21	0.22	1.00								
Pb	0.00	0.00	0.00	1.00							
Cu	0.24	0.21	0.53	0.00	1.00						
Cd	-0.10	-0.02	0.01	0.00	0.02	1.00					
Temperatura	-0.16	-0.11	-0.30	0.00	0.02	0.12	1.00				
Humedad Relativa	-0.11	-0.11	-0.49	0.00	-0.30	-0.07	-0.08	1.00			
Presión Barométrica	0.20	0.14	0.19	0.00	0.04	-0.12	-0.81	0.03	1.00		
Precipitación	-0.09	-0.05	-0.23	0.00	-0.17	-0.06	0.02	0.56	-0.04	1.00	
Velocidad del viento	0.02	0.02	0.61	0.00	0.30	0.18	0.00	-0.37	-0.17	-0.09	1.00