

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

**INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



**“Caracterización Física y Distribución de Masa de PM_{2.5}, en la
Ciudad y Valle de Mexicali, B. C.”**

***Tesis para obtener el grado de:
Maestro en Ciencias***

***Presenta
Miguel Ángel Canales Rodríguez***

Director: Dr. Margarito Quintero Núñez

Mexicali, B. C.

09 de junio 2010

*Dedicatoria:
A mi abuela y mi abuelo*

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos al Dr. Margarito Quintero Núñez por su confianza y generosidad al compartir sus conocimientos, su apoyo y disposición a escucharme durante el desarrollo de esta. Del mismo modo manifestar mi admiración por la profundidad y seriedad de su trabajo.

Agradezco a los doctores del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería y a mis sinodales de tesis sin cuyas diferentes visiones mi proceso de aprendizaje y el presente trabajo no habrían alcanzado el nivel logrado.

Agradezco también al programa de becas CONACYT por el financiamiento a esta investigación.

Un especial agradecimiento a mis compañeros de cubículo: M I Lourdes Meza Trejo, Dr. Andrés Moncada Aguilar, Dr. Rodolfo de la Fuente.

Un agradecimiento a mis amigos de residuos: Hugo, Samantha, Wendy, a mis compañeras de climatología: Adriana, Elizabeth, y un profundo agradecimiento al señor Enrique Dávalos por su ayuda en mi tesis.

Agradezco también a la Dra. Sylvia Ahumada y al Dr. Rafael García Cueto por su excelente ayuda durante toda mi maestría, disculpen que haya sido tan enfadoso.

Y a todos mis amigos y compañeros del Instituto de Ingeniería con los que he compartido momentos buenos y muy buenos.

Y a mis abuelos, padres, hermanos y familia por ayudarme en todo.

Muchas gracias amor por tu ayuda en estos meses, gracias Carla.

Sinceramente, su amigo Miguel A. Canales Rodríguez.

RESUMEN

El creciente interés existente en la actualidad por la investigación en el campo del material particulado atmosférico se debe a la identificación de efectos adversos de este contaminante sobre la salud y los ecosistemas. El principal objetivo de este trabajo de investigación fue evaluar los niveles de partículas menores a 2.5 micrometros ($PM_{2.5}$) en dos zonas seleccionadas del municipio de Mexicali: la ciudad de Mexicali (zona urbana) y el ejido Guadalupe Victoria (zona rural) con dos tipos diferentes de filtros: cuarzo y teflón. Con este fin se diseñó un proyecto basado en: a) la interpretación de diferentes series temporales de $PM_{2.5}$ en otoño de 2008 e invierno de 2009, b) comparación de niveles de $PM_{2.5}$ entre las dos zonas de estudio, y c) comparación de niveles de $PM_{2.5}$ entre los dos tipos de filtros. A lo largo de la investigación se llevaron a cabo dos muestreos de $PM_{2.5}$, cada tercer día en una estación de cada una de las zonas de estudio. Para eso se usaron cuatro equipos muestreadores de PM_{10} y $PM_{2.5}$ llamados "Minivol" a un flujo de 5 L/min. En cada zona de estudio se utilizaron dos equipos: uno con filtro de cuarzo y otro con filtro de teflón por periodos de 24 horas.

Los rangos de los niveles de $PM_{2.5}$ obtenidos para las dos zonas de estudio se dan en los siguientes términos para el período otoño 2008-invierno 2009:

	Otoño - cuarzo	Otoño - teflón	invierno - cuarzo	Invierno - teflón
Zona urbana	12.13 – 231.54	2.43 – 60.31	0.49 – 838.38	8.48 – 338.25
Zona rural	18.90 – 243.83	3 – 74.39	12.72 – 885.05	3.64 – 140.51

A partir de estos datos, se evidenció que en la temporada de otoño los niveles de $PM_{2.5}$ fueron mucho más altos que en la temporada de invierno (65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $PM_{2.5}$ límite de la NOM). Para la temporada de otoño hubo diez violaciones (cuatro para la zona urbana, seis para la zona rural) mientras para la temporada de invierno hubo diez y nueve violaciones (diez para la zona rural, nueve para la zona urbana), donde la mayoría de las violaciones fueron producto del filtro de cuarzo.

Tomando en consideración los análisis químicos realizados al material particulado bajo estudio se puede decir que el origen principal de las $PM_{2.5}$ proviene de emisiones industriales y de automóviles, actividades de quema y formación secundaria de contaminantes.

INDICE

INDICE	i
INDICE DE FIGURAS	iii
INDICE DE TABLAS	ix
RESUMEN	xii
I.- INTRODUCCIÓN	1
1.1.- Introducción	1
1.2.- Antecedentes de la región.	2
1.3.- Contenido de la tesis.	5
1.4.- Planteamiento del problema	6
1.5.- Hipótesis	7
1.6.- Objetivo general	7
1.7.- Objetivos específicos	7
1.8.- Justificación	8
II.- MARCO TEÓRICO	9
2.1.- Características de la atmósfera	9
2.1.1.- Aspectos meteorológicos	10
2.1.2.- Inversión térmica	11
2.1.3.- Fuentes de contaminación atmosférica	12
2.2.- Definición de PM _{2.5} y su composición química	15
2.3.- Estudios previos sobre PM _{2.5}	17
2.4.- Características de las PM _{2.5}	21
2.4.1.- Causas de la proliferación de las PM _{2.5}	22
2.4.2.- Importancia de la morfología y tamaño de partícula.	23
2.5.- Efectos de los contaminantes criterios en la salud	31
2.6.- Efectos principales de las PM _{2.5} sobre la salud del ser humano	32
2.6.1.- Vía de entrada al cuerpo humano	35
2.7.- Normas de calidad del aire	38

III.- MÉTODOS Y MATERIALES	39
3.1.- Método	39
3.1.1.- Campaña de monitoreo	39
3.1.2.- Caracterización química	41
3.2.- Materiales	41
3.2.1- Filtros	41
3.3.- Equipos	42
3.3.1.- Muestreador de partículas con equipo de bajo volumen.	43
3.3.2.- Métodos analíticos	49
3.3.3.- Rosa de los vientos	50
IV.- RESULTADOS	54
4.1- Resultados de la campaña de verano - otoño.	54
4.1.1.- Resultados de la zona rural.	57
4.1.2.- Resultados de la zona urbana.	75
4.2- Resultados de la campaña de invierno.	94
4.2.1.- Resultados de la zona rural	95
4.2.2.- Resultados de la zona urbana	112
4.3.- Análisis de la información de PM _{2.5} (BAM) encontrada en el Sistema de Calidad del Aire de los Estados Unidos (AQS “Air Quality System”)	128
V.- CONCLUSIONES	133
5.1.- Conclusiones	133
5.2.- Composición química	138
5.3.- Alcances y limitaciones	139
5.4.- Líneas futuras	140
ANEXOS	141
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	143

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.- Localización del municipio de Mexicali en el estado de Baja California	3
Figura 2.1.- Capas de la atmosfera	9
Figura 2.2.- El humo de un fuerte incendio inclinado horizontalmente, muestra donde se encuentra el techo de la inversión térmica.	11
Figura 2.3.- Comparación del cabello humano contra el diámetro de las $PM_{2.5}$ y PM_{10}	16
Figura 2.4.- Distribuciones de los componentes químicos de las $PM_{2.5}$	17
Figura 2.5.- Distribución del número de partículas en función del diámetro	28
Figura 2.6.- Distribución granulométrica del material particulado en función del número de partículas, la superficie y la masa.	29
Figura 2.7.- Órganos internos que atraviesan las $PM_{2.5}$ en el cuerpo humano	35
Figura 2.8.- Interior del pulmón humano donde se alojan las $PM_{2.5}$	36
Figura 3.1.- Mapa de la ciudad de Mexicali y el Ejido Guadalupe Victoria	39
Figura 3.2.- Ubicación de los primeros dos monitores en el Instituto de Ingeniería	40
Figura 3.3.- Ubicación de los dos últimos monitores en un rancho cercano al ejido Guadalupe Victoria	40
Figura 3.4.- Filtros de teflón y cuarzo dentro del anillo antigravitatorio.	42
Figura 3.5.- Balanza Analítica y Micro balanza	43
Figura 3.6.- Monitor de bajo volumen (“Minivol airmetrics”)	44
Figura 3.7.- Controlador de tiempo programable y la bomba de succión	45
Figura 3.8.- Ensamblado del cabezal de $PM_{2.5}$ con protección para la lluvia	45
Figura 3.9.- Rosa de los Vientos	51
Figura 3.10.- Rosa de los vientos de Agosto del 2006	52
Figura 3.11.- Rosa de los vientos de febrero del 2006	53

Figura 4.1.- Tormenta de arena en el valle de Mexicali	55
Figura 4.2.- Hornos de ladrillos del valle de Mexicali	56
Figura 4.3.- Concentración de $PM_{2.5}$ con el filtro de cuarzo para la zona rural	62
Figura 4.4.- Concentración de $PM_{2.5}$ con el filtro de teflón para la zona rural	62
Figura 4.5.- Tamaño de las partículas contenidas en el filtro de teflón para el día 29 de septiembre de la zona rural	63
Figura 4.6.- Espectro de dispersión de energía del filtro de teflón de la zona rural	65
Figura 4.7.- Tamaño de las partículas contenidas en el filtro de cuarzo de la zona rural para el día 5 de septiembre del 2008	66
Figura 4.8.- Espectro de dispersión de energía del filtro de cuarzo de la zona rural	67
Figura 4.9.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la temperatura del aire para el filtro de cuarzo para la zona rural	68
Figura 4.10.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la velocidad del viento para el filtro de cuarzo para la zona rural	69
Figura 4.11.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la humedad relativa para el filtro de cuarzo para la zona rural	69
Figura 4.12.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la temperatura del aire para el filtro de teflón para la zona rural	70
Figura 4.13.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la velocidad del viento para el filtro de teflón para la zona rural	71
Figura 4.14.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la humedad relativa para el filtro de teflón para la zona rural	71
Figura 4.15.- Rosa de los vientos del mes de septiembre del 2008 para la zona rural	72
Figura 4.16.- Rosa de los vientos del mes de octubre del 2008 para la zona rural	73

Figura 4.17.- a) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra presión atmosférica para la zona rural; b) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra temperatura del aire para la zona rural	74
Figura 4.18.- a) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra temperatura del aire para la zona rural; b) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra velocidad del viento para la zona rural	75
Figura 4.19.- Concentración de $PM_{2.5}$ con el filtro de cuarzo de la zona urbana	79
Figura 4.20.- Concentración de $PM_{2.5}$ con el filtro de teflón de la zona urbana	80
Figura 4.21.- Tamaño de las partículas contenidas en el filtro de Teflón de la zona urbana para el día 14 de septiembre del 2008	81
Figura 4.22.- Espectro de dispersión de energía del filtro de teflón de la zona urbana	82
Figura 4.23.- Tamaño de las partículas contenidas en el filtro de Teflón de la zona urbana para el día 27 de septiembre del 2008	82
Figura 4.24.- Espectro de dispersión de energía del filtro de cuarzo para la zona urbana	83
Figura 4.25.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la temperatura del aire para el filtro de cuarzo para la zona urbana	85
Figura 4.26.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la velocidad del viento para el filtro de cuarzo para la zona urbana	85
Figura 4.27.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la humedad relativa para el filtro de cuarzo para la zona urbana	86
Figura 4.28.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la temperatura del aire para el filtro de teflón para la zona urbana	87
Figura 4.29.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la velocidad del viento para el filtro de teflón para la zona urbana	87

Figura 4.30.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la humedad relativa para el filtro de teflón para la zona urbana	88
Figura 4.31.- Rosa de los vientos del mes de septiembre del 2008 para la zona urbana	89
Figura 4.32.- Rosa de los vientos del mes de octubre del 2008 para la zona urbana	89
Figura 4.33.- a) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra presión atmosférica para la zona urbana; b) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra temperatura del aire para la zona urbana	92
Figura 4.34.- a) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra presión atmosférica para la zona urbana; b) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra temperatura del aire para la zona urbana	93
Figura 4.35.- Quema de residuos agrícolas	94
Figura 4.36.- Concentración de $PM_{2.5}$ en el filtro de cuarzo en la zona rural	100
Figura 4.37.- Concentración de $PM_{2.5}$ en filtro de teflón en la zona rural	100
Figura 4.38.- Tamaño de las partículas contenidas en el filtro de teflón en la zona rural del 17 de enero del 2008	101
Figura 4.39.- Espectro de dispersión de energía del filtro de teflón para la zona rural	102
Figura 4.40.- Tamaño de las partículas contenidas en el filtro de cuarzo de la zona rural para el día 11 de enero del 2008	103
Figura 4.41.- Espectro de dispersión de energía del filtro de cuarzo para la zona rural	104
Figura 4.42.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la temperatura del aire en el filtro de cuarzo para la zona rural	105
Figura 4.43.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la velocidad del viento para el filtro de cuarzo para la zona rural	106
Figura 4.44.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la humedad relativa para el filtro de cuarzo para la zona rural	106

Figura 4.45.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la temperatura del aire para el filtro de teflón para la zona rural	107
Figura 4.46.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la velocidad del viento para el filtro de teflón para la zona rural	108
Figura 4.47.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la humedad relativa para el filtro de teflón para la zona rural	108
Figura 4.48.- Rosa de los vientos para enero del 2009 para la zona rural de la ciudad de Mexicali	109
Figura 4.49.- a) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra presión ambiental para la zona rural; b) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra velocidad del viento para la zona rural	111
Figura 4.50.- a) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra presión ambiental para la zona urbana; b) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra temperatura del aire para la zona urbana	112
Figura 4.51.- Concentración de $PM_{2.5}$ con el filtro de cuarzo para la zona urbana	117
Figura 4.52.- Concentración de $PM_{2.5}$ con el filtro de teflón para la zona urbana	117
Figura 4.53.- Tamaño de las partículas contenidas en el filtro de teflón para la zona urbana para el día 1 de Enero del 2008	118
Figura 4.54.- Espectro de dispersión de energía en el filtro de teflón para la zona urbana	119
Figura 4.55.- Tamaño de las partículas contenidas en el filtro de cuarzo para la zona urbana para el día 17 de enero del 2008.	120
Figura 4.56.- Espectro de dispersión de energía en el filtro de cuarzo para la zona urbana	121
Figura 4.57.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra temperatura del aire para el filtro de cuarzo para la zona urbana	122

Figura 4.58.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la velocidad del viento para el filtro de cuarzo para la zona urbana	122
Figura 4.59.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la humedad relativa para el filtro de cuarzo para la zona urbana	123
Figura 4.60.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la temperatura del aire para el filtro de teflón para la zona urbana	124
Figura 4.61.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la velocidad del viento para el filtro de teflón para la zona urbana	124
Figura 4.62.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la Humedad relativa para el filtro de teflón para la zona urbana	125
Figura 4.63.- Rosa de los vientos para enero del 2009 para la zona urbana de la ciudad de Mexicali.	126
Figura 4.64.- a) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra temperatura del aire para la zona urbana; b) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra velocidad del viento para la zona urbana	127
Figura 4.65.- a) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra presión ambiental para la zona urbana; b) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra velocidad del viento para la zona urbana	128
Figura 4.66.- Concentración de $PM_{2.5}$ durante el mes de septiembre del 2007 para la ciudad de Mexicali	130
Figura 4.67.- Tendencia histórica anual de Concentración de $PM_{2.5}$ de 2003 al 2008 para la ciudad de Mexicali	131
Figura 4.68.- Tendencia de días violados de $PM_{2.5}$ de 2003 al 2008 para la ciudad de Mexicali	131
Figura I.- Formato de sesión de pesaje de filtros	140
Figura II.- Hoja de campo sobre el análisis gravimétrico	141

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.- Efectos potenciales de los principales contaminantes sobre la salud del ser humano	32
Tabla 2.2.- Normas oficiales mexicanas para evaluar la calidad del aire ambiente	38
Tabla 3.1.- Ejemplo de frecuencias utilizadas para las Rosas de Viento	52
Tabla 4.1.- Análisis gravimétrico para los filtros de cuarzo	58
Tabla 4.2.- Análisis gravimétrico para los filtros de teflón	58
Tabla 4.3.- Qfin (flujo patrón) del muestreador que contenía el filtro de cuarzo en la zona rural	59
Tabla 4.4.- Qfin (flujo patrón) del muestreador que contenía el filtro de teflón en la zona rural	60
Tabla 4.5.- Concentraciones de las PM _{2.5} en el filtro de cuarzo para la zona rural	61
Tabla 4.6.- Concentraciones de las PM _{2.5} en el filtro de teflón para la zona rural	61
Tabla 4.7.- Elementos encontrados en el filtro de teflón de la zona rural	64
Tabla 4.8.- Elementos encontrados en el filtro de cuarzo de la zona rural	66
Tabla 4.9.- Análisis gravimétrico para los filtros de cuarzo de la zona urbana	76
Tabla 4.10.- Análisis gravimétrico para los filtros de teflón para la zona urbana	76
Tabla 4.11.- Qfin (flujo patrón) del muestreador que contenía el filtro de cuarzo para la zona urbana.	77
Tabla 4.12.- Qfin (flujo patrón) del muestreador que contenía el filtro de teflón para la zona urbana.	77
Tabla 4.13.- Concentraciones de las PM _{2.5} en el filtro de cuarzo para la zona urbana	78

Tabla 4.14.- Concentraciones de las PM _{2.5} en el filtro de teflón para la zona urbana	78
Tabla 4.15.- Elementos encontrados en el filtro de teflón de la zona urbana	81
Tabla 4.16.- Elementos encontrados en el filtro de cuarzo para la zona urbana	83
Tabla 4.17.- Análisis gravimétrico para los filtros de cuarzo de la zona rural	95
Tabla 4.18.- Análisis gravimétrico para los filtros de teflón de la zona rural	96
Tabla 4.19.- Qfin (flujo patrón) del muestreador que contenía el filtro de cuarzo en la zona rural	97
Tabla 4.20.- Qfin (flujo patrón) del muestreador que contenía el filtro de teflón en la zona rural	97
Tabla 4.21.- Concentraciones de las PM _{2.5} en el filtro de cuarzo de la zona rural	98
Tabla 4.22.- Concentraciones de las PM _{2.5} en el filtro de teflón de la zona rural	99
Tabla 4.23.- Elementos encontrados en el filtro de teflón para la zona rural	102
Tabla 4.24.- Elementos encontrados en el filtro de cuarzo para la zona rural	104
Tabla 4.25.- Análisis gravimétrico para los filtros de cuarzo para la zona rural	113
Tabla 4.26.- Análisis gravimétrico para los filtros de teflón para la zona rural.	113
Tabla 4.27.- Qfin (flujo patrón) del muestreador que contenía el filtro de cuarzo para la zona urbana	114
Tabla 4.28.- Qfin (flujo patrón) del muestreador que contenía el filtro de teflón para la zona urbana	115
Tabla 4.29.- Concentraciones de las PM _{2.5} con el filtro de cuarzo para la zona urbana	115
Tabla 4.30.- Concentraciones de las PM _{2.5} con el filtro de teflón para la zona urbana	116
Tabla 4.31.- Elementos encontrados en el filtro de teflón para la zona Urbana	119

Tabla 4.32.- Elementos encontrados en el filtro de teflón para la zona urbana	120
Tabla 4.31.- Datos de AQS	129
Tabla 4.32.- Promedio mensual del mes de julio del 2007	130
Tabla 4.33.- Datos de la AQS de Airs de la USEPA de 2003 al 2008 para la ciudad de Mexicali	132

RESUMEN

El creciente interés existente en la actualidad por la investigación en el campo del material particulado atmosférico se debe a la identificación de efectos adversos de este contaminante sobre la salud y los ecosistemas. El principal objetivo de este trabajo de investigación fue evaluar los niveles de partículas menores a 2.5 micrometros ($PM_{2.5}$) en dos zonas seleccionadas del municipio de Mexicali: la ciudad de Mexicali (zona urbana) y el ejido Guadalupe Victoria (zona rural) con dos tipos diferentes de filtros: cuarzo y teflón. Con este fin se diseñó un proyecto basado en: a) la interpretación de diferentes series temporales de $PM_{2.5}$ en otoño de 2008 e invierno de 2009, b) comparación de niveles de $PM_{2.5}$ entre las dos zonas de estudio, y c) comparación de niveles de $PM_{2.5}$ entre los dos tipos de filtros. A lo largo de la investigación se llevaron a cabo dos muestreos de $PM_{2.5}$, cada tercer día en una estación de cada una de las zonas de estudio. Para eso se usaron cuatro equipos muestreadores de PM_{10} y $PM_{2.5}$ llamados “Minivol” a un flujo de 5 L/min. En cada zona de estudio se utilizaron dos equipos: uno con filtro de cuarzo y otro con filtro de teflón por periodos de 24 horas.

Los rangos de los niveles de $PM_{2.5}$ obtenidos para las dos zonas de estudio se dan en los siguientes términos para el período otoño 2008-invierno 2009:

	Otoño - cuarzo	Otoño - teflón	invierno - cuarzo	Invierno - teflón
Zona urbana	12.13 – 231.54	2.43 – 60.31	0.49 – 838.38	8.48 – 338.25
Zona rural	18.90 – 243.83	3 – 74.39	12.72 – 885.05	3.64 – 140.51

A partir de estos datos, se evidenció que en la temporada de otoño los niveles de $PM_{2.5}$ fueron mucho más altos que en la temporada de invierno (65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de $PM_{2.5}$ límite de la NOM). Para la temporada de otoño hubo diez violaciones (cuatro para la zona urbana, seis para la zona rural) mientras para la temporada de invierno hubo diez y nueve violaciones (diez para la zona rural, nueve para la zona urbana), donde la mayoría de las violaciones fueron producto del filtro de cuarzo.

Tomando en consideración los análisis químicos realizados al material particulado bajo estudio se puede decir que el origen principal de las $PM_{2.5}$ proviene de emisiones industriales y de automóviles, actividades de quema y formación secundaria de contaminantes.

I.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Introducción

El material particulado atmosférico se define como un conjunto de partículas sólidas y/o líquidas (a excepción del agua pura) presentes en suspensión en la atmósfera (**Mészáros E., 1999**). Generalmente, el término aerosol atmosférico se utiliza como sinónimo de partículas atmosféricas, aunque esta definición no es estricta. Es necesario considerar que el término material particulado atmosférico es un concepto amplio que engloba tanto las partículas en suspensión como las partículas sedimentables (diámetro > 20 μm), caracterizadas por un corto tiempo de residencia en la atmósfera (varias horas)

Las partículas atmosféricas pueden ser emitidas por una gran variedad de fuentes de origen natural o antropogénico. Respecto a los mecanismos de formación, las partículas pueden ser emitidas como tales a la atmósfera (primarias) o bien ser generadas por reacciones químicas (partículas secundarias). Dichas reacciones químicas pueden consistir en la interacción entre gases precursores en la atmósfera para formar una nueva partícula por condensación, o entre un gas y una partícula atmosférica para dar lugar a un nuevo aerosol por adsorción o coagulación (**Warneck P., 1988**).

Como resultado de esta variabilidad de fuentes y transformaciones, el material particulado atmosférico consiste en una mezcla compleja de compuestos de naturaleza orgánica e inorgánica con diferentes distribuciones granulométricas y composición química, ambas condicionadas por la composición de los gases que las rodean. Los niveles de material particulado atmosférico se suelen expresar en forma de concentración de masa o número de partículas por unidad de volumen de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ o n/cm^3).

La contaminación atmosférica por material particulado se define como la alteración de la composición natural de la atmósfera como consecuencia de la entrada en suspensión de partículas, ya sea por causas naturales o por la acción del hombre (**Mészáros E., 1999**).

En cuanto a Mexicali, existe un número importante de actividades humanas que han provocado graves problemas de contaminación (**Chow J. C. et al, 2000**), desde un excesivo uso de automotores en mal estado o viejos, hasta las quemas de residuos agrícolas tanto en el Valle de Mexicali del lado mexicano, como en el Valle Imperial del americano. En particular, Mexicali es una de las zonas urbanas del país donde se registran los mayores índices de contaminación por partículas suspendidas respirables (**INE, 2006**). Para el análisis de la dinámica de la contaminación por partículas suspendidas en Mexicali se cuenta con una red de monitoreo atmosférico pertenecientes al gobierno del estado de Baja California (cuatro monitores automáticos y dos mecánicos) que incluye monitores de partículas suspendidas menores a 10 micrómetros (PM_{10}). Sin embargo, la información sobre los niveles y composición de partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$) es escasa ya que únicamente un monitor lleva a cabo esta medición, que es el instalado en el Instituto de Ingeniería de la UABC.

1.2.- Antecedentes de la región.

Mexicali, es la capital del estado de Baja California (**Figura 1.1**). Según el censo del año 2000 tenía una población de 784,709 habitantes. En el 2005 alcanzó los 855,962 habitantes. El municipio de Mexicali está dividido en dos partes: Zona Urbana y Valle de Mexicali (**INEGI, 2005**). Sus coordenadas geográficas son: al Norte $32^{\circ} 43'$, al Sur $30^{\circ} 52'$ de latitud Norte; al Este $114^{\circ} 42'$ y al Oeste $115^{\circ} 56'$ de longitud Oeste. Tiene colindancia al Norte y al Este con los EEUU, al Este con Sonora y el Golfo de California; al Sur con el Golfo de California y el municipio de Ensenada; al Oeste con los municipios de Ensenada y Tecate.

La característica orográfica más importante del municipio es la de encontrarse el 30% de su territorio ocupado por sierras, resaltando, las sierras de Juárez con 1,885 Km² y 3,300 metros de altura y San Pedro Mártir con 10 Km² y con altura de 2,800 metros. Además, se tienen otras sierras, como son: el Cerro del Centinela con una elevación de 750 metros, y cubre 10 Km²; la sierra Cucapah, con 364 Km² y una altura de 1,000 metros. El volcán cerro Prieto, con 7 Km² y una elevación de 260 metros, entre otras (**Enciclopedia de los municipios, 2002**).

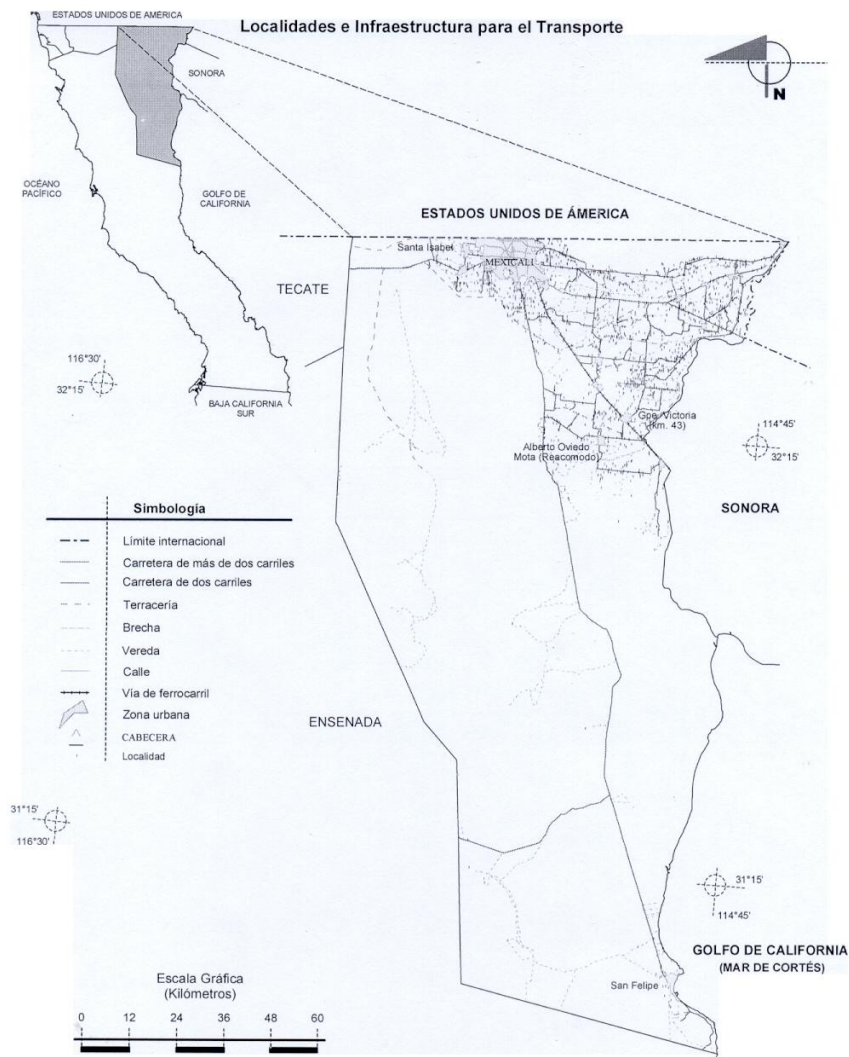


Figura 1.1.- Localización del municipio de Mexicali en el estado de Baja California

La principal corriente de agua es el río Colorado con un escurrimiento medio anual de 1.850.254.000 m³, cuyo destino es el distrito de riego No. 14 de la ciudad de Mexicali, zonas urbanas del valle y la ciudad de Tijuana por medio del acueducto río Colorado-Tijuana. (**Enciclopedia de los municipios, 2002**).

Una característica física muy importante es el clima, pues el valle está localizado bajo una banda solar lo que provoca que los veranos sean muy largos y los inviernos muy cortos. El clima es muy seco y la precipitación promedio es ligeramente superior a 7.62 cm/año (**Quintero N. M. y Sweedler A., 2003**). La temperatura promedio en verano es de 38 °C llegando a registrarse máximas de 52 °C, la temperatura media anual es de 23 °C, siendo el mes más frío enero con una media mensual de 12.7 °C (**Ramírez R., M. E., 2008**).

El desarrollo de Mexicali fue impulsado inicialmente por la actividad agrícola. En el Valle de Mexicali es donde se practica la agricultura de riego, con una superficie bruta de 340,000 hectáreas. Los principales cultivos en el municipio son: trigo, cebada, algodón, alfalfa, avena, ajonjolí, sorgo forrajero, hortalizas para exportación y consumo regional; chile, cebolla, rabanito, cilantro, lechuga, brócoli, betabel, coliflor, jitomate, pepino, calabaza, quelite y espárrago. (**Enciclopedia de los municipios, 2002**)

En Mexicali existe una industria muy diversificada, ocupando el primer lugar la de productos alimenticios donde se cuentan con pasteurizadoras de lácteos, embotelladoras, molinos de trigo, tortillerías y empacadoras de carne, entre las más importantes. La industria maquiladora está altamente desarrollada, siendo Mexicali el pionero en México en esta rama industrial, inicialmente con la costura; actualmente operan aproximadamente 190 plantas maquiladoras con 55.857 personas empleadas. El desarrollo de la industria de transformación y la maquiladora, ha sido principalmente en el ramo de alimentos, automotriz, metal, mecánica, envases de vidrio, electrónica, plástico y textil. Mexicali cuenta con una

planta geotermoeléctrica de 720 Mw de capacidad (**Enciclopedia de los municipios, 2002**).

1.3.- Contenido de la tesis.

La tesis está formada por 5 capítulos. Del capítulo 2 al 4 representan el cuerpo principal del documento; es en estos capítulos donde se presenta el desarrollo cronológico el desarrollo de la investigación realizada. Se detallara el contenido de cada uno de los capítulos en los siguientes párrafos. Este capítulo es una breve introducción al tema. Mientras en el capítulo 5 se presentaran las conclusiones a las que se llego derivadas de la presente investigación así como los alcances y limitaciones que tuvo el proyecto del que se está hablando, con una propuesta de líneas de investigaciones futuras que conduzcan a un mayor entendimiento del comportamiento de los niveles, características físicas y químicas de las PM_{2.5} en la región.

El capítulo 1, presenta la introducción a la tesis, el planteamiento del problema, se justifica el trabajo, se dan los objetivos de la tesis y por último se da la hipótesis.

En el capítulo 2 se presenta la revisión bibliográfica, se describen las investigaciones en torno a las PM_{2.5} en la región, se da una definición de partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}), características químicas y físicas, causas de sus proliferación, importancia morfológica, tamaño y vida media de la partícula. Así mismo en el capítulo se habla de las vías de entrada de las PM_{2.5} al cuerpo humano. Por último se habla de los efectos que tienen estas partículas en el cuerpo humano y las normas oficiales mexicanas que rigen la calidad del aire.

El capítulo 3 contiene la metodología, que es más que todo los pasos que se necesitaron para llegar a un buen resultado en la investigación. Comienza con el método a usar que consiste en la descripción de la campaña de monitoreo que se uso para capturar el material particulado y la caracterización química que se le

realizo a los filtros más característicos: Lo siguiente fue elegir los filtros y equipo a usar, para eso se dio una breve explicación del funcionamiento del muestreador de bajo volumen, así como una explicación muy extendida de cómo se logro que nuestro muestreo llegara a buen término, y por ultimo una breve explicación de los métodos analíticos que se usaron y la rosas de los vientos.

Los resultados y la discusión de la investigación se explican en el capítulo 4, en la se dividen los resultados en dos partes: la campaña de otoño y la campaña de invierno; cada campaña está dividida por zona urbana y zona rural. En cada campaña se hicieron análisis gravimétrico, análisis químico, análisis meteorológico y análisis estadístico. Por último se hizo un análisis a la base de datos AQS y sobre la composición química de las partículas encontradas en el aire de Mexicali.

Para el capítulo 5 se presentan las conclusiones a las que se llegaron después de terminada la investigación, así como los límites y alcances de la investigación. Para finalizar este capítulo se habla de las posibles líneas futuras.

1.4.- Planteamiento del problema

El continuo interés que ha provocado la contaminación del aire de Mexicali en la comunidad científica local a provocado desde años atrás un continuo número de investigaciones en torno a los diferentes contaminantes criterios, desde el monóxido de carbono (CO) hasta el Material particulado (PM₁₀, PM_{2.5}, PST). Sin embargo la mayoría de las investigaciones regionales apuntan hacia la zona urbana dejando de lado lo que es la zona rural, siendo este el origen de la mayoría de los contaminantes que constituyen el material particulado,

Las causas de este problema no son solamente físicas es decir provocadas por la temperatura, la velocidad del aire y la humedad, si no también pueden ser de otro orden como son la quema de cultivos procedentes del norte y sur de la ciudad, la

resuspensión de polvo provenientes de caminos pavimentados y no pavimentados de la zona urbana así como la quema de basura, llantas, etc,

Por todo esto es importante conocer los niveles del material partícula menor a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$) tanto de la zona urbana como en la zona rural para poder ver como interactúa la contaminación del aire con los diferentes aspectos meteorológicos y poder realizar acciones con el fin de mitigar su efecto en la comunidad. Otro punto que se desea conocer es saber qué zona es la que contamina mas, para eso se contrasta la zona urbana contra la zona rural.

1.5.- Hipótesis

Los niveles de $PM_{2.5}$ difieren significativamente en la zona urbana respecto al valle de Mexicali debido a los diversos factores atmosféricos que hacen que la zona urbana sea la más contaminada, debido a que en invierno la contaminación llega desde el norte, mientras en verano la contaminación llega desde el sur, provocando que los niveles de $PM_{2.5}$ sea de los más altos del país

1.6.- Objetivo general

Evaluar los niveles de $PM_{2.5}$ y su caracterización física en la ciudad y valle de Mexicali.

1.7.- Objetivos específicos

- Evaluar los niveles de $PM_{2.5}$ tanto en la zona urbana como en la zona rural de Mexicali.
- Comparar los niveles de $PM_{2.5}$ entre la zona urbana y la zona rural de Mexicali.
- Ver los efectos de los aspectos meteorológicos en los niveles de $PM_{2.5}$.

1.8.- Justificación

A pesar que en la actualidad los estudios sobre $PM_{2.5}$ son escasos y gracias a ellos se ha logrado relacionar el impacto potencial de estas partículas en la salud humana. Para esto se ha considerado una variedad de factores que puedan ser los originarios del problema como: el tamaño de partícula, la resuspensión, la dispersión en el ambiente, la entrada al cuerpo humano, su composición química, Las diferencias de tamaño de las partículas, el tiempo de exposición, la concentración de estas en la atmosfera y la gran variedad de factores atmosféricos son importantes para su estudio y clasificación.

La mayoría de los proyectos que se han hecho en la región, han sido dirigidos directamente a la zona urbana de Mexicali, dejando de lado a la zona rural es por eso que se a querido iniciar un trabajo de investigación en el cual la zona rural sea mencionada debido a que muchos de los contaminantes y el polvo propio de la región va del valle a la ciudad.

II.- MARCO TEÓRICO

2.1.- Características de la atmósfera

La atmósfera tiene una edad de 4.500 millones de años (**Figura 2.1**); Su composición es de 78 % de nitrógeno, 21 % de oxígeno y 1 % de otros gases. La atmósfera se extiende hasta unos 600 Km. por encima del planeta tierra, y se divide en cuatro capas concéntricas: troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera. Entre dos de ellas, siempre hay una pausa (zona de transición), la más conocida es la tropopausa, la primera yendo hacia arriba, tras la troposfera, limita la parte de la atmósfera en la que ocurre la vida y donde se sitúan la mayoría de sus componentes: gases y vapor de agua, este último regula la temperatura al absorber la radiación solar y el calor terrestre.

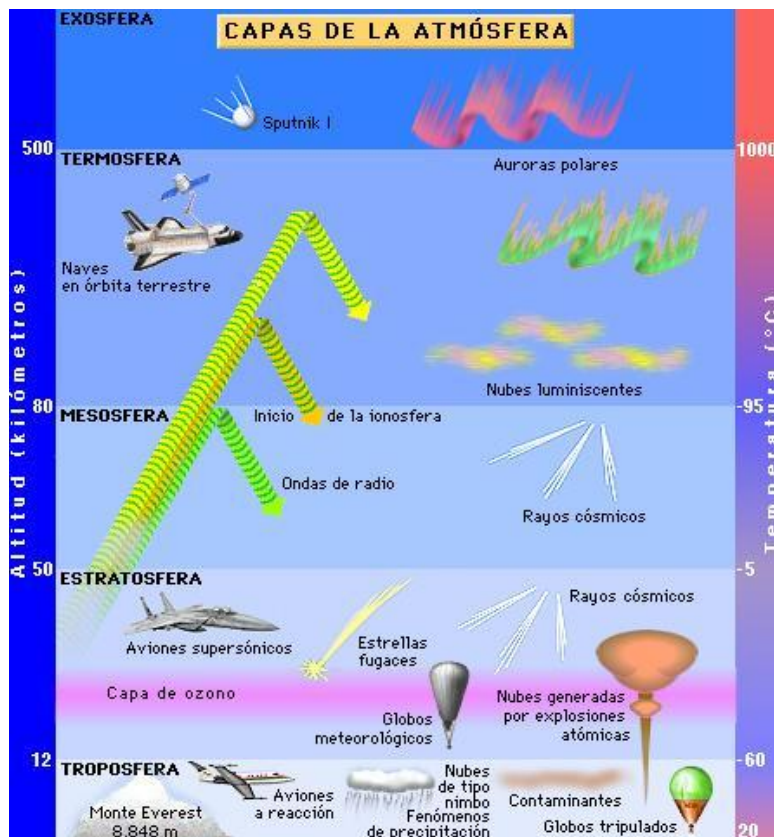


Figura 2.1.- Capas de la atmósfera

(<http://recursos.cnice.mec.es/biosfera/alumno/1ESO/atmosfera/img/atmosfera%20capas.jpg>)

La troposfera, donde ocurre la meteorología, es la capa más delgada: de 8 Km. (en los polos) a 14 Km. (en el ecuador), al ir subiendo la temperatura desciende unos 6 °C por Km., hasta alcanzar los 52 °C bajo cero, la estratosfera se extiende hasta unos 50 Km., por lo que su espesor es de unos 30 Km. alberga la capa de ozono (O₃), a una altitud entre 20 y 30 Km., que absorbe la radiación ultravioleta (a una longitud de onda entre 290 nm y 320 nm).

Sin la capa de ozono, la vida hubiera podido tener lugar, la retención de los rayos ultravioleta provoca un aumento de la temperatura en la estratosfera superior, que llega a estar a "sólo" 3 °C bajo cero, lo que comúnmente es aire, se sitúa en la troposfera y la estratosfera, en la mesosfera, ya casi no queda, esta capa llega hasta los 85 Km. y desciende a 83 °C bajo cero a causa de la altitud y la ausencia de ozono y vapor que retengan calor, la termosfera se expande hasta los 600 Km, la temperatura puede superar los 1.000 °C, la ionosfera es la parte de la termosfera ionizada por la radiación solar, y es responsable del fenómeno de las auroras, la termosfera da paso a la exosfera (**La flecha, 2007**).

2.1.1.- Aspectos meteorológicos

El viento, la humedad, la temperatura del aire, la presión atmosférica, la inversión térmica y las precipitaciones tienen un papel importante en el aumento o disminución de la contaminación. El viento generalmente favorece la difusión de los contaminantes ya que desplaza las masas de aire en función de la presión y la temperatura. El efecto que causa el viento depende de la orografía del terreno o incluso de los edificios en las zonas urbanizadas. Al contrario del viento, la humedad juega un papel negativo en la evolución de los contaminantes ya que favorece la acumulación de humos y polvo.

2.1.2.- Inversión térmica

La inversión térmica (IT) es un fenómeno atmosférico muy común que ocurre con frecuencia en grandes áreas donde los vientos son muy débiles y la componente vertical del viento es descendente, de forma tal que la temperatura aumenta con la altura unos pocos decenas de metros en lugar de disminuir como es normal. Cuando esto ocurre, las partículas de aire se mueven muy poco y quedan atrapadas en una capa desde la superficie del terreno hasta una altura de cientos de metros o menos. Si este aire no es “limpio” y contiene grandes cantidades de contaminantes, estos últimos provocan una elevación sustancial de los índices que miden la calidad del aire (IMECAS) y pueden ocurrir contingencias ambientales importantes (**Meulenert Peña, A. R, 2007**)

Observe en la **Figura 2.2** como el humo de un incendio asciende hasta cierta altura y comienza a inclinarse horizontalmente en el “techo” de la inversión. A partir de ese punto las partículas de humo no pueden seguir ascendiendo y se mezclan con el aire debajo de ellas, ocasionando un incremento de la contaminación del aire.



Figura 2.2.-El humo de un fuerte incendio inclinado horizontalmente, muestra donde se encuentra el techo de la inversión térmica.

2.1.3.- Fuentes de contaminación atmosférica

La utilización de combustibles fósiles es una de las principales fuentes de la contaminación atmosférica, tanto en procesos industriales, como en transportes o generación de calor. Además, algunos procesos diferentes de la combustión contribuyen considerablemente a las emisiones contaminantes. Se suele distinguir la contaminación urbana de la industrial, siendo la primera, la derivada del transporte y de establecimientos industriales de pequeño tamaño, mientras que por contaminación industrial es producida por procesos industriales de cierta entidad.

Las principales fuentes artificiales emisoras de los contaminantes atmosféricos son las centrales térmicas, la industria petroquímica, la siderurgia, las industrias de sector metalúrgico y del cemento, en lo que respecta al sector industrial; el transporte, las calefacciones, las instalaciones de incineración de basura doméstica y desechos industriales.

A) Fuentes puntuales

Son fuentes industriales estacionarias que liberan emisiones, derivadas de la generación de energía eléctrica y de actividades industriales como: la alimentaria, madera, metalurgia, manufacturera y procesadora de productos vegetales, entre otras.

La industria ladrillera es un ejemplo, en donde el proceso de elaboración del ladrillo contribuye al deterioro de los recursos naturales como son el aire, el agua y el suelo. La operación irregular de los hornos ladrilleros da como resultado la dispersión de contaminantes, debido a la utilización de combustibles inadecuados, causando daños al medio ambiente, y a la salud de la población (**Negrete N, D., 2007**).

B) Fuentes de área

Incluyen algunas fuentes comerciales y/o industriales tales como talleres de carrocería y tintorerías, fuentes fugitivas tales como polvo de caminos pavimentados y sin pavimentar. Incluyen la generación de emisiones inherentes a actividades y procesos, como el consumo de solventes, limpieza de superficies, tratamiento de aguas residuales, plantas de composteo (**Negrete N, D., 2007**).

En Mexicali, existe una diversidad de fuentes generadoras de contaminantes de fuentes de área, las cuales destacan por su cantidad emitida las siguientes:

- Los vehículos.
- Por ser una zona agrícola, en el Valle de Mexicali se realizan quemas de residuos de cultivos, cuya contaminación es transportada por los vientos. Otras fuentes características son las comidas preparadas al carbón.
- Los cruces fronterizos son una fuente importante de emisiones.
- Los autobuses urbanos tienden a terminar las rutas en el centro de la ciudad creando aglomeraciones continuas (**Negrete N, D., 2007**).

C) Fuentes móviles

Incluyen a los aviones, helicópteros, ferrocarriles, tranvías, tractocamiones, autobuses, camiones, automóviles, motocicletas, embarcaciones, equipo y maquinarias no fijas con motores de combustión y similares, que por su operación generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmosfera:

l) Fuentes móviles que circulan por carretera: Incluyen todos los vehículos motorizados que están autorizados para operar (automóviles, camionetas, autobuses, motocicletas). Se incluye el polvo de caminos pavimentados y sin pavimentar.

a) Flota vehicular: Mexicali se encuentra sobre un terreno plano, el cual está dividido por una red de calles irregulares. Las vialidades que registran mayor tráfico en la ciudad son: el Blvd. Lázaro Cárdenas, el Blvd. López Mateos, la Calzada Justo Sierra, el Blvd. Francisco L. Montejano y la calzada Independencia.

El padrón de automóviles particulares tiene registrados 390,000 vehículos de los cuales el 77.8 % son modelos del año 1996 y anteriores, el otro 22.6 % corresponde a vehículos con modelos que van desde el año 1997 a 2008. Mexicali al ser una ciudad fronteriza, la mayoría de estos automóviles son importados de EE.UU. Esto ha provocado un aumento de parque vehicular, así como un incremento de contaminación ambiental por las emisiones de estos vehículos que una vez estando en la ciudad se les modifica los sistemas de inyección de combustible y los sistemas de anticontaminantes dando como resultado mayores emisiones de contaminantes.

II) Fuentes móviles que no circulan por carretera: Incluyen todo el equipo que se mueve por su propia energía, o que es portátil, y que no está autorizado para operar en caminos públicos, como los son las pavimentadoras de asfalto, compactadoras de lamina, aplanadoras, trituradoras y procesadoras, equipo de pavimentación, excavadoras, niveladoras, tractores y otros equipos de construcción, además de equipos agrícolas como: segadoras, empacadoras, tractores agrícolas, equipo hidráulico.

D) Fuentes naturales

Se refiere en particular a todo aquello emitido por la vegetación y la actividad microbiana en suelos y océanos, que se les denomina emisiones biogénicas, cuyo papel es importante en la química de la troposfera al participar directamente en la formación de ozono.

E) Vegetación y erosión de suelos

Las emisiones de este sector dependen de varios factores, como el tipo de suelo (aquí es de textura arcillo-arenosa), la precipitación pluvial (menor a 100 mm anuales), las velocidades de los vientos, y la cobertura vegetal de los cultivos agrícolas.

En este sector lo que más se emite son partículas PM_{10} , donde la principal fuente de emisión es la erosión del suelo por efecto del viento, debido a su ubicación en una zona desértica y debido a una extensa superficie que no cuenta con vegetación durante varios meses del año, los tipos de suelo favorecen el aporte de partículas por efecto del viento y la escasa precipitación pluvial que se registra en la región.

Se estima que la erosión del suelo aporta el 24 % de las emisiones de PM_{10} . Por otro lado se consideran las emisiones de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos generados por los suelos y la vegetación: aunque es una zona con escasa vegetación, tiene un área importante dedicada a la agricultura, donde las emisiones generadas son derivadas de las actividades metabólicas de las plantas y microbiológicas de los suelos, que dependen directamente del tipo de cultivos existentes en la zona. Las emisiones de hidrocarburos generadas por la vegetación contribuyen con el 7 % de los hidrocarburos del inventario (INE, 1999).

2.2.- Definición de $PM_{2.5}$ y su composición química

Las $PM_{2.5}$ o partículas finas son un contaminante del aire constituido por material sólido o líquido suspendido en la atmósfera con un diámetro igual o menor a 2.5 milésimas de milímetro. Comparado con las medidas del cabello humano que va entre 50 y 70 μm , las $PM_{2.5}$ son 100 veces más delgadas que el cabello humano (**Figura 2.3**). Por su tamaño, las partículas finas pueden ingresar hasta los

alvéolos pulmonares, donde se depositan y ocasionan lesiones graves en los tejidos blandos.



Figura 2.3.- Comparación del cabello humano contra el diámetro de las $PM_{2.5}$ y PM_{10} (Chow, J. C et al, 2000)

La composición de las partículas que se encuentran en la atmósfera urbana son complejas y heterogéneas, ya que pueden variar de un lugar a otro, dependiendo de su origen; por ejemplo, algunos de sus componentes son pólenes, esporas de algas y hongos, al igual que moléculas de origen biológico, como endotoxinas, proteínas, etc., asociadas con procesos alérgicos e inflamatorios. Otros componentes de las partículas, especialmente de aquellas que se originan por procesos de quema de combustible orgánico, son los sulfatos, los metales pesados y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (**Ponciano et al, 2001**).

Análisis químicos anteriores han dado como resultado la siguiente distribución de contribuciones en $PM_{2.5}$: 6.4 % de material geológico (crustales); 0.9 % de elementos traza; 54.3 % de material orgánico; 13.8 % de nitrato de amonio; 6.5 % de sulfato de amonio; 7.9 % de NaCl, y 10.1% de carbón elemental (**Carvacho, O. F. et al, 2006**)

En la **Figura 2.4** se muestran las siguientes distribuciones de los componentes químicos que contribuyen a la formación de las $PM_{2.5}$:

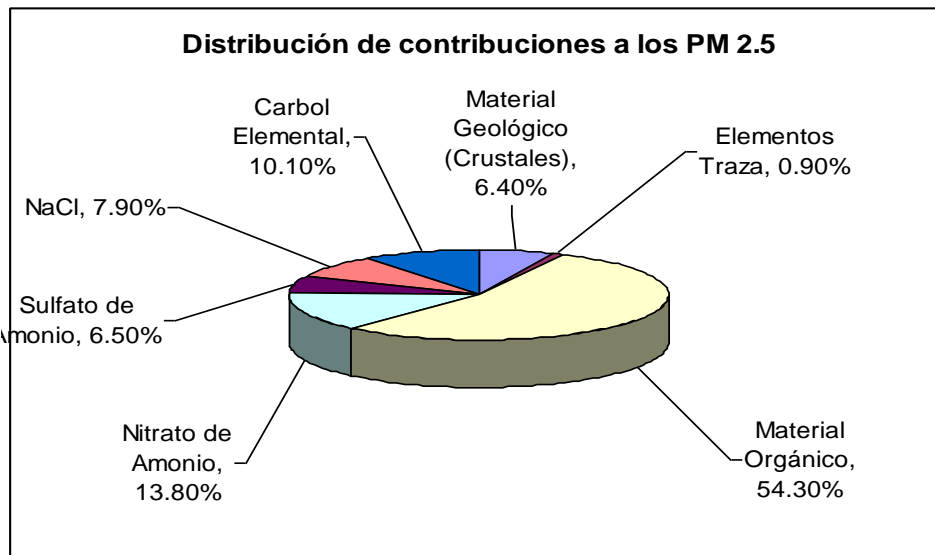


Figura 2.4.- Distribuciones de los componentes químicos de las $PM_{2.5}$ (Mendoza, 2004)

La composición química tanto de los PM_{10} y $PM_{2.5}$ en un estudio realizado en el valle de san Joaquín, California, Estados Unidos fue:

Hidrogeno (H), aluminio (Al), silicio (Si), calcio (Ca), titanio (Ti), fierro (Fe), azufre (S), vanadio (V), cromo (Cr), manganeso (Mn), níquel (Ni), cobre (Cu), zinc (Zn), galio (Ga), mercurio (Hg), arsénico (As), plomo (Pb), selenio (Se), bromo (Br), rubidio (Rb) y estroncio (Sr) y otros elementos (**Carvacho, O. F. et al, 2006**)

2.3.- Estudios previos sobre $PM_{2.5}$

Los estudios sobre $PM_{2.5}$ en la cuenca atmosférica Valle Imperial y Valle de Mexicali en general han sido muy escasos. De 1997 a la fecha se está llevando a cabo un seguimiento (inicialmente por la Agencia Ambiental de los EE. UU., y ahora por la Secretaria de Protección al Ambiente del Gobierno del Estado de Baja California) a las $PM_{2.5}$ en la estación de monitoreo del aire del Instituto de Ingeniería, UABC, de manera automática con el equipo conocido como BAM

(Monitor de atenuación beta), por lo cual no se tiene un registro de su composición.

Un estudio reciente mostró resultados interesantes de un muestreo llevado a cabo en la ciudad de Mexicali donde se evidenció una predominancia de material orgánico (54.3 %) (**Mendoza D, A y Pardo C, E. I., 2004**). En cuanto a la cantidad de masa de $PM_{2.5}$ se encontró que el origen de las mismas se debe a las fuentes vehiculares con un 45 % (diesel 26.35 % y gasolinas 19.4 %) la contribución de aerosoles con un 32.3 % (aerosoles inorgánicos 21.06 % y la preparación de alimentos 11.30 %) (**Vallesa S, R. A. et al, 2004**).

En cambio en el Valle de San Joaquín, California, EEUU que es esencialmente agrícola, se encontró que el $PM_{2.5}$ representa del 6 al 7 % de la masa de los PM_{10} en todos los tipos de suelo, mientras que las $PM_{2.5}$ muestran la siguiente composición: 37 al 66 % provienen de los minerales del suelo, 32 al 41 % de la materia orgánica, del 2 al 21 % de sulfatos, y 3 % de metales varios (**Carvacho, O. F. et al, 2006**).

Algunos trabajos de investigación han especificado el origen de las PM_{10} y las $PM_{2.5}$; uno de ellos menciona que el principal problema de esta región es la quema de los residuos agrícolas en los valles de Mexicali en México y en el valle imperial de lado estadounidense, donde las principales emisiones son el metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), bióxido de nitrógeno (NO_2), hidrocarburos (C_nH_{2n+2}) y por supuesto el material particulado ya señalado; algunos de estos gases son tipo efecto invernadero (**Moncada A, A. y Quintero N. M., 2005**). También se menciona que los pólenes y esporas son partes importante dentro del estudio, ya que este material vivo tiene un diámetro que va de 2.5 a 50 micras (**Ahumada V, S. E., 2007**).

Otro lugar de donde provienen estas partículas es el mismo suelo por efecto del viento debido a su ubicación desértica con una textura arcillosa-arenosa y con una

precipitación menor a 100 mm anuales. Aunado a esto existe una superficie de doce millones de m² de vialidades pavimentadas comparado con ocho millones de m² sin pavimento en la zona urbana, donde los vehículos que circulan provocan una turbulencia que libera polvo más fino (**Quintero N. M. et al, 2001**).

Para **Reyes Z. E et al (2003)**, las partículas varían de acuerdo a sus propiedades físicas, donde las partículas finas (PM_{2.5}) se comportan como gas o vapor y están sujetas al movimiento browniano, las cuales fluyen aerodinámicamente y son capaces de coagularse y condensarse. Las partículas de la fracción fina provienen generalmente de la quema de combustibles fósiles en automóviles.

Una fracción importante es producida en la atmósfera a través de la conversión química de emisiones naturales y antropogénicas (SO₂, amoniaco, etc.). La composición de las partículas puede ser muy variada, ya que contienen todo tipo de compuestos orgánicos e inorgánicos. Entre los primeros, algunos de los más comunes son fenoles y alcoholes. En cuanto a lo segundo, incluyen nitratos, sulfatos y metales, como plomo, hierro y zinc.

Para **Osornio A. (2007)** la concentración de material particulado en la ciudad fronteriza de Mexicali está entre los más altos de México debido a su clima árido y al predominio de caminos sin pavimentar. La evidencia sugiere que partículas más grandes son altamente tóxicas y que la toxicidad se puede asociar a la composición y a las fuentes distintas de la partícula. La identificación de las características y de la composición de la materia de partículas que induce efectos sobre la salud es crucial en el diseño de intervenciones reguladoras más eficaces.

Para detectar estas partículas ambientales, en Mexicali existen seis estaciones de monitoreo en la ciudad, cuatro de ellas automáticas con el mismo objetivo de conocer los parámetros de O₃, CO, NO₂, PM₁₀ y otras dos mecánicas donde se buscan PM₁₀ (**Quintero N, M, 2001**). En el pasado también se les hacía un seguimiento a las partículas suspendidas totales (PST). Este sistema de monitoreo

se comenzó a usar en Mexicali desde 1997 y la información generada es validada a través de métodos de control de calidad, establecidas en guías publicadas por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (USEPA).

Algunos estudios se han hecho para saber cuál es el efecto de los diferentes contaminantes del aire. Uno de los estudios que se hizo en espacios interiores (**Ruiz O, N. S. y Reyna C, M. A., 2006**), se evidencio que los gases se dispersan y se depositan como polvo o entran a nuestro pulmones, afectando o provocando malestar y enfermedades a largo plazo esto se debe a que los pulmones están expuestos a las partículas del aire debido a las enfermedades infecciosas que son transmitidas por virus y bacterias patógenas en el ambiente, ambos son fácilmente transportadas en partículas de polvo y gotitas que causan infecciones y alergias al sistema respiratorio; otra razón es que las partículas menores a 2.5 μm entran a los pulmones, penetran hasta los alvéolos ocasionando su obstrucción y por ende problemas de respiración.

Las enfermedades más comunes son: fiebre del heno, influenza, sinusitis, tos, difteria e infección en la garganta, otras serian asma bronquial, neumonía, bronquitis y tuberculosis (**Quintero N. M., 2001**).

El potencial del material particulado para inducir males a la salud puede ser asociado a uno o más de sus características físicas y químicas, incluyendo la masa, el tamaño, el número, la superficie y la composición. Se ha aceptado tradicionalmente que las partículas de origen geológico que forman una parte de la fracción gruesa (con un diámetro entre 2.5 y 10 μm , también conocido como partículas inhalables) representan un riesgo más bajo para la salud de la población.

La mayoría de los estudios epidemiológicos que han identificado una asociación entre la contaminación atmosférica y la salud se han realizado en las zonas urbanas donde las partículas finas, también conocidas como la fracción respirable

(materia de partículas con un diámetro aerodinámico menor de 2.5 μm), constituyen aproximadamente 60 % de la masa PM_{10} (**Osornio A., 2007**).

La tendencia para los próximos años sobre la calidad del aire de la ciudad de Mexicali respecto a los PM_{10} es desalentadora, debido a que no ha disminuido la media anual (**Ahumada V, S. E., 2007**), por el contrario, está teniendo un ligero crecimiento (**Quintero N, M. y Vega R, A., 2006**), violándose la norma mexicana con respecto a la media aritmética anual de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y excediéndose los 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por 24 horas.

2.4.- Características de las $\text{PM}_{2.5}$

Son sólidos y líquidos que se pueden sedimentar, incluyen polvo y cenizas. Los gases incluyen a los vapores, muchas veces son invisibles y a veces no se detectan con el olfato.

Algunos de los contaminantes gaseosos más comunes son el monóxido de carbono, el ozono, los óxidos de nitrógeno y de azufre. Los gases no se sedimentan sino que permanecen en la atmósfera, se transforman en compuestos más simples, complejos o forman parte de los ciclos biogeoquímicos.

Los efectos que los contaminantes causan en la salud humana son diferentes y el grado de afectación puede variar dependiendo de la edad de las personas. El tiempo de vida de las partículas varía con el tamaño. Las más grandes pueden durar dentro de la atmósfera minutos u horas y viajar distancias cortas. Sin embargo, cuando ocurren tormentas de polvo, se hacen grandes mezclas de partículas en la atmósfera, en donde las de tamaño más pequeño pueden tener un tiempo de vida más largo y viajar grandes distancias. Las partículas finas tienen poca deposición debido a que pueden ser transportadas miles de kilómetros y permanecer en la atmósfera por varios días.

2.4.1.- Causas de la proliferación de las PM_{2.5}

Las partículas atmosféricas pueden ser emitidas por una gran variedad de fuentes de origen natural o antropogénico:

- Actividades naturales: volcanes, incendios forestales, polvo, erosión de la tierra, etc.
- Actividades humanas: caminos sin pavimentar, plaguicidas, fábricas, contaminación por autos, quemas agrícolas y emisiones de plantas.

Los contribuyentes de PM_{2.5} varían según la región. Las zonas rurales tienen caminos no pavimentados que emiten polvo con el flujo de los automotores y actividades agrícolas, además debido a las tormentas de viento y a las actividades de construcción se ve un aumento en la generación de material particulado en regiones desérticas.

Los orígenes y cantidades de emisiones de material particulado en diferentes regiones son afectados por la meteorología, por la geografía, por la población y por el uso de la tierra, a esto hay que agregarle que la combustión de madera en zonas frías incrementa substancialmente la concentración de partículas en el aire durante el invierno. El efecto de los contaminantes atmosféricos en la salud del ser humano puede estudiarse en dos situaciones distintas:

- En episodios de contaminación aguda, cuando una o varias sustancias nocivas alcanzan concentraciones muy elevadas en el atmósfera durante varios días combinada con condiciones climatológicas adversas como frentes fríos e inversiones térmicas de cierta duración.
- En contaminación de tipo crónico, las concentraciones de los contaminantes atmosféricos no llegan a ser tan elevadas como en el caso anterior; sin embargo, presentan valores que fluctúan con respecto a los

límites permisibles de manera cotidiana y en este caso la exposición es continua durante periodos muy largos.

2.4.2- Importancia de la morfología y tamaño de partícula.

A) Principales tipos de partículas atmosféricas

La materia mineral constituye la fracción mayoritaria en cuanto a masa del aerosol atmosférico 44% de las emisiones (**Duce R. A., 1995; IPCC, 1996**); La emisión de partículas minerales se genera por la acción de los vientos sobre la superficie terrestre, en forma de emisiones fugitivas; La mayor emisión de este tipo de partícula se produce en regiones áridas o semi-áridas, durante los periodos de sequía, estos depósitos se ven expuestos a elevadas temperaturas y a la circulación de masas de aire, que inducen su inyección en la atmósfera; La distribución granulométrica de este tipo de partícula se concentra principalmente en tres modas de diámetros 1.5, 6.7 y 14.2 μm (**Alfaro S. C. et al., 1998**).

La abundancia de estas partículas dentro de cada una de las modas depende de la velocidad del viento, de modo que a bajas velocidades se produce la resuspensión de las partículas de mayor diámetro, mientras que al incrementar la velocidad se emiten las partículas de menor diámetro. La emisión de partículas de origen mineral depende de la superficie del suelo, de la humedad y la cobertura vegetal (**Marticorena B. et al., 1997**).

La composición química y mineralógica de estas partículas varía de una región a otra dependiendo de las características y composición de los suelos, generalmente está constituida por calcita (CaCO_3), cuarzo (SiO_2), dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$], arcillas [caolinita, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, e illita, $\text{K}(\text{Al,Mg})_3\text{SiAl}_{10}(\text{OH})$], feldspatos [KAlSi_3O_8 y $(\text{Na,Ca})(\text{AlSi})_4\text{O}_8$], sulfato cálcico ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y óxidos de hierro (Fe_2O_3), entre otros.

El origen de estas partículas es primario, emitidas directamente a la atmósfera. En general, la composición del material mineral transportado desde regiones desérticas suele estar enriquecida en arcillas, como consecuencia de su mayor tiempo de residencia, su menor diámetro de partícula y morfología (**Pósfai M. y Molnár A., 2000**). A pesar de que la mayor parte de las emisiones son de origen natural, se considera la existencia de un número limitado de fuentes de material mineral de origen antropogénico como la construcción, la minería, etc., que generan partículas minerales, ya sea a través de la propia actividad o durante los procesos de manipulación.

El aerosol marino es el segundo tipo de partícula con mayor importancia en cuanto al volumen total de 38 % de las emisiones (**IPCC, 1996**). Al igual que el material mineral, las partículas de aerosol marino son en su mayoría de origen natural y son emitidas directamente a la atmósfera (partículas primarias).

Los compuestos de Azufre (sulfatos) en la atmósfera son generalmente partículas de origen secundario, ya que no son emitidos directamente a la atmósfera sino que se generan como resultado de la oxidación de precursores gaseosos (principalmente SO_2), el diámetro de este tipo de partícula suele ser $< 1\mu\text{m}$ (**EPA, 1996**), también existen fuentes naturales y antropogénicas de sulfatos primarios, como los yacimientos yesíferos, los procesos industriales de producción de ácido sulfúrico, la producción y manipulación de productos minerales tales como el yeso.

Los compuestos de Azufre (S) representan aproximadamente el 7-10 % de las emisiones (**IPCC, 1996**). Los gases de origen natural precursores de los sulfatos son emitidos a través de emisiones biogénicas y durante las emisiones volcánicas (**Andrae, M. O. y Crutzen, P. J., 1997**). Los sulfatos de origen no natural, por otra parte, constituyen la fracción principal del material particulado atmosférico antropogénico (**Chuang C. C. et al., 1997**). La producción antropogénica de gases precursores de los sulfatos de origen secundario se centra esencialmente en los procesos del combustible fósil con alto contenido en azufre (S).

Los Compuestos de Nitrógeno (Nitratos), se encuentran principalmente en la atmósfera como los son NO_3^- y NH_4^+ , al igual que los sulfatos, son de origen mayoritariamente secundario y provienen de la reacción de precursores gaseosos naturales y antropogénicos. Estos compuestos representan aproximadamente del 2 al 5 % de las emisiones (**IPCC, 1996**).

El diámetro de las partículas atmosféricas suele ser también $< 1\mu\text{m}$ (**EPA, 1996**); Los compuestos nitrados de origen natural se suelen originar a partir de las emisiones de los suelos (nitrificación, N_2O), los incendios forestales (NO_2 , NO), las descargas eléctricas (NO) y las emisiones biogénicas (NH_3) (**Seinfeld J. C. y Pandis S. N., 1998**). Las emisiones naturales de NO y NO_x a escala global constituyen la tercera parte de las emisiones antropogénicas (**Mészáros E., 1993**).

En cuanto a los precursores gaseosos de los nitratos de origen antropogénico, en la actualidad se conocen numerosas fuentes emisoras entre las cuales destacan la producción eléctrica (combustión de gas, fuel-oil y carbón) y otros procesos de combustión a temperaturas elevadas (capaces de oxidar el N_2 atmosférico) tales como los que ocurren en los motores de los vehículos y la quema de biomasa. Los principales gases emitidos por fuentes naturales y antropogénicas son así NO , NO_2 , N_2O y NH_3 , cuya oxidación en la atmósfera tiene como resultado más frecuente la formación de ácido nítrico (HNO_3) y amonio (NH_4^+).

Los compuestos de carbono (C) comprenden una amplia variedad de especies naturales y antropogénicas de composición y estructura diversa, cuya característica es la presencia de Carbono. Su estudio, se distingue generalmente entre carbono elemental (CE) y materia orgánica. Debido a su máxima capacidad de absorción de la radiación emitida (**Sloane C. S. et al., 1991**), el carbono elemental (grafítico) puede ser denominado negro carbón (NC); Esta fracción suele ser emitida directamente a la atmósfera (partículas primarias) por procesos

de combustión incompleta (gas, carbón y/o combustible), y por tanto su origen es esencialmente antropogénico.

Los compuestos de carbono orgánico, pueden ser emitidos directamente a la atmósfera (por fuentes naturales y antropogénicas) o formarse por condensación de compuestos orgánicos volátiles (COVs, de origen natural o antropogénico). El término soot (hollín) es utilizado en ocasiones para denominar la suma de MO+CE primario, aunque este término no se encuentra bien definido en la actualidad (EPA, 1996; Pósfai M. y Molnár A., 2000). Por último, es posible encontrar cantidades limitadas de carbono atmosférico en carbonatos (CaCO_3 y MgCO_3 , naturales y/o antropogénicos).

Los compuestos carbonosos representan aproximadamente el 2-5 % de las emisiones globales (IPCC, 1996). La emisión de compuestos orgánicos de origen natural se produce a través de la vegetación, la superficie de los océanos y los suelos, y puede dar lugar a partículas tanto primarias como secundarias en la atmósfera. Entre las partículas primarias están los compuestos vegetales y edafológicos, tales como esporas, polen, microorganismos y hongos. La granulometría de estas partículas es altamente variable, ya que pueden encontrarse en las fracciones más finas o gruesas del aerosol atmosférico. El material carbonoso primario de origen antropogénico, tiene su principal fuente en la generación eléctrica (procesos de combustión).

Es necesario considerar también la contribución de otras fuentes de origen industrial como los aportes del tráfico. Dentro de las ciudades es necesario destacar las emisiones del tráfico, y en especial las de los vehículos diesel, cuya contribución a los niveles de materia carbonosa es cinco veces superior a la de los motores de gasolina (Kim E. y Hopke P. K., 2003).

Sin embargo, actualmente existen dudas acerca de la importancia de los aportes producidos por motores de gasolina antiguos en conjunto con las emisiones

producidas en el arranque en frío de los motores de gasolina en general, que pueden llegar a superar las emisiones de los vehículos diesel. En cuanto a las partículas de carbono antropogénico de origen secundario, aproximadamente el 50% proviene de la evaporación de gasolina, la gasolina líquida y las emisiones de los vehículos (**Watson J. G. et al., 2001**).

De los compuestos de carbono (c) más comunes son:

- El carbono elemental Según **Hansen A. D. A. y Rosen H. (1990)**, proviene principalmente de los motores diesel constituyéndose así como la principal fuente de carbono elemental antropogénico en la atmósfera. Las partículas de CE presentan una granulometría fina, generalmente $\approx 0.1 \mu\text{m}$.
- La materia orgánica está compuesta por una mezcla de compuestos orgánicos; La concentración de OM suele expresarse como el contenido en carbono orgánico (CO), aunque de esta forma se desprecia la contribución de otros elementos como O, N y H. Con objeto de evitar esta pérdida de masa, la concentración de OC se suele multiplicar por un factor de 1.5 (**Wolff G. T. et al., 1991**) o 1.4 (**White W. H. y Macias E. S., 1989**) para estimar la concentración de materia orgánica (MO). La masa de MO puede llegar a representar entre 10-25 % de PM_{10} y entre 11-25 % de $\text{PM}_{2.5}$ (**Wolff G. T. et al., 1991**). En términos de masa la mayor parte de estas partículas se encuentra generalmente en torno a $1 \mu\text{m}$, aunque en lo referente al número de partículas el 85 % se acumula en la fracción $<0.1 \mu\text{m}$.

B) Tamaño de la partícula

El diámetro de las partículas atmosféricas varía desde nanómetros (nm) hasta decenas de micras (μm). Generalmente se identifican diferentes rangos de tamaños de partícula denominados “modas”, que están relacionados en su mayoría con el mecanismo de formación de las partículas: nucleación, Aitken, acumulación y moda gruesa (**Figura 2.5**).

La denominación de las partículas en determinados rangos granulométricos varía en función del ámbito de estudio, sea en ciencias atmosféricas, epidemiología o calidad del aire. Así, se denomina “partículas finas” en ciencias atmosféricas a las partículas de diámetro $<1\mu\text{m}$, en epidemiología esta definición abarca las partículas de diámetro $<2.5\mu\text{m}$. Mientras, en estudios epidemiológicos se hace referencia a partículas gruesas a partir de $2.5\mu\text{m}$ de diámetro, mientras que en ciencias de la atmósfera se consideran gruesas las partículas de diámetro $>1\mu\text{m}$.

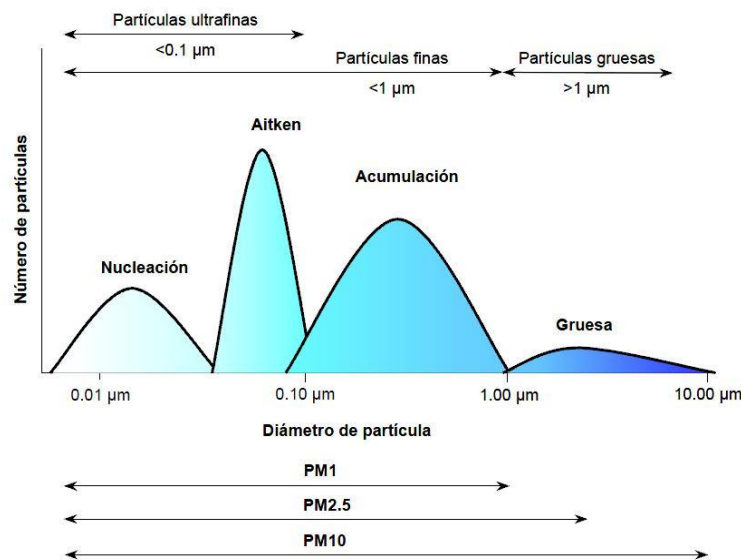


Figura 2.5.- Distribución del número de partículas en función del diámetro (EPA, 1996).

En términos de calidad del aire se definen cuatro parámetros fundamentales de tamaño de partículas: PST, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y PM_1 (**Figura 2.5**). El término PST se refiere a Partículas Suspendidas Totales, PM_{10} se define como la masa de partículas que tiene un diámetro aerodinámico $\leq 10\mu\text{m}$. La misma definición para diámetros $2.5\mu\text{m}$ y $1\mu\text{m}$ se aplica para $\text{PM}_{2.5}$ y PM_1 , respectivamente.

En la **Figura 2.6** se muestra un ejemplo que representa la distribución del material particulado en función del número, superficie y masa de las partículas. En primer lugar, las partículas de las modas de nucleación y Aitken dominan el número de partículas. La distribución en función de la superficie, muestra un máximo entorno a $0.1\mu\text{m}$ lo cual indica que en este diámetro se produce la acumulación de masa

de forma más efectiva por procesos de coagulación y condensación. También se detectó un incremento en la superficie en las partículas gruesas. Por último, la distribución de la masa se concentra en la moda gruesa.

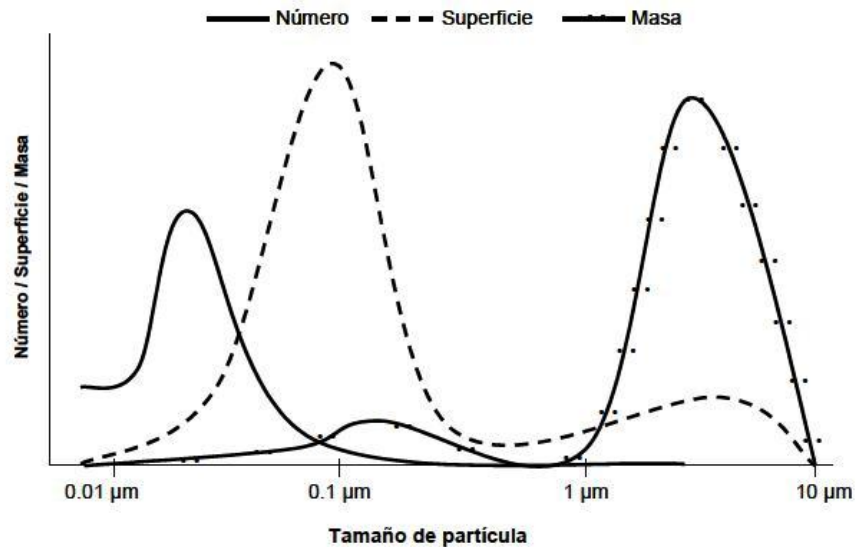


Figura 2.6.-Distribución granulométrica del material particulado en función del número de partículas, la superficie y la masa.

Estos resultados concuerdan con **Putaud J. P. et al (2002)** en un estudio realizado en 33 puntos de muestreo repartidos por toda Europa, en el que se concluye que el número de partículas incrementa en mayor medida que la masa en zonas contaminadas. Ello se explica con el incremento en la concentración de partículas de menor tamaño en las zonas con mayor grado de contaminación con respecto a áreas más limpias. Análisis de la distribución granulométrica llevados a cabo en este estudio afirman que entre el 70-80 % de las partículas presentan un diámetro <100 nm. El mismo autor afirma que no existe una relación “universal” entre PM_{10} y $PM_{2.5}$, entre la masa, el número o la composición química de las partículas. Estos mismos autores concluyen que el radio de las $PM_{2.5}/PM_{10}$ tiende a incrementar con la concentración de PM_{10} , aunque las estaciones de tráfico suponen una excepción ya que se observa la situación opuesta (mayor concentración de partículas gruesas debido al tráfico).

C) Vida media de las partículas en la atmósfera

Tras su emisión o formación en la atmósfera, la extracción del material particulado en suspensión se produce por diversos mecanismos, por deposición seca o por deposición húmeda, cuya eficacia depende del diámetro, composición química y propiedades termodinámicas de las partículas. En primer lugar, el tiempo de residencia atmosférica posee una relación inversa con el tamaño de partícula (para partículas de diámetro >50 nm).

La vida media de las partículas de la moda de nucleación (<0.02 μm) es muy reducida (horas), debido a su rápida transformación a la moda Aitken. Por su parte, el tiempo de residencia en suspensión de las partículas de la moda gruesa incrementa al disminuir el diámetro: varias horas para las partículas de diámetro >20 μm , y de 2-4 días para partículas de 2-3 μm .

Finalmente, las partículas en las modas de acumulación y en el límite superior de la moda Aitken (0.1-1 μm) presentan el mayor tiempo de residencia en la atmósfera (**Mészáros E., 1999**). Esto se debe a que el transporte se produce principalmente en la troposfera libre, aunque en áreas cercanas al foco emisor la capa límite también se ve afectado en determinadas épocas del año. En la troposfera libre el transporte se ve favorecido por dos factores: a) el aumento de la velocidad del viento en altura, y b) la menor incidencia en altura de los procesos de lavado de las masas de aire (**Prospero J. M., 1999**).

En cuanto a su composición química, la vida media de las partículas tiene mucho que ver con el carácter higroscópico de las mismas. Las partículas de diámetro >0.1 μm (modas de acumulación y gruesa) actúan como eficientes núcleos de condensación debido a que suelen contener una importante fracción soluble en agua, y por ello uno de sus principales mecanismos de retirada de la atmósfera es la deposición húmeda. De esta manera, la vida media de las partículas entre 0.1-1 μm se considera similar a la del agua (alrededor de 10 días, **Pósfai M. y Molnár**

A., 2000). Por último, la vida media puede depender también de las propiedades termodinámicas de las partículas.

La distribución entre las fases sólida y gaseosa de numerosas especies químicas depende de las condiciones ambientales, tales como la temperatura y la humedad relativa. Las mayores variaciones de humedad y temperatura se producen con el cambio de estaciones en el año, por lo que las concentraciones de estas especies presentan una determinada evolución estacional.

A modo de ejemplo, el nitrato amónico (NH_4NO_3) no es en términos generales estable en fase particulada en verano y es por ello que la evolución estacional de este compuesto en PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ suele presentar máximos en invierno y mínimos en verano.

2.5.- Efectos de los contaminantes criterios en la salud

Se considera como contaminación del aire a la adición de cualquier sustancia que altere sus propiedades físicas o químicas, siendo los contaminantes atmosféricos considerados como referencia: el CO, los NO_x , el SO_2 , el O_3 y las PST cuyos componentes pueden ser muy diversos: metales pesados, sulfatos, entre otros.

En la **Tabla 2.1** se resumen los efectos que causan algunos contaminantes como el ozono, el monóxido de carbono, el bióxido de nitrógeno, el bióxido de azufre, las PM_{10} , los aerosoles ácidos y el plomo, según estratos de edad y los grupos en riesgo.

Tabla 2.1.- Efectos potenciales de los principales contaminantes sobre la salud del ser humano (Ruiz O. N. 2006)

Contaminante	Población expuesta y grupo de riesgo	Efectos potenciales en la salud
Ozono (O ₃)	Adultos y niños	Reducción en la función pulmonar, Inflamación pulmonar, Irritante a los pulmones, ojos y nariz, Asociado a los ataques cardíacos
Monóxido de Carbono (CO)	Adultos	Suministro reducido de oxígeno, Reducción en la capacidad laboral, manual y mental
	Pacientes con anemia	Riesgo mayor de problemas cardiovasculares, Angina de Pecho
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	Adultos	Irritación en los pulmones, Baja resistencia a infecciones pulmonares, Incremento a la sensibilidad a las alergias.
	Niños	Función pulmonar reducida. Riesgo mayor de infecciones respiratorias.
Dióxido de Azufre (SO ₂)	Adultos con enfermedades cv,	Incremento en enfermedades respiratorias
	Enfermedades crónicas; niños y ancianos	Incremento de hospitalización. Función respiratoria reducida.
PST PM ₁₀ PM _{2.5}	Niños	Incremento en enfermedades respiratorias Función pulmonar reducida
	Asmáticos	Incremento de la agudización del asma
	Adultos	Afecta la capacidad respiratoria, Tejido pulmonar dañado y Causa cáncer y muerte prematura
Plomo	Adultos	Afecta el riñón, hígado, sistema nervioso y otros órganos.
	Niños	Daño al sistema nervioso central y lento crecimiento

2.6.- Efectos principales de las PM_{2.5} sobre la salud del ser humano

Las partículas presentes en la atmósfera contienen numerosos compuestos orgánicos y se forman a partir de: vapores orgánicos volátiles y semivolátiles, material orgánico y la fracción orgánica adsorbida de la ceniza. Se sabe que los nitratos y los sulfuros pueden ser tóxicos.

Por su parte el carbón elemental (CE) y el carbón negro causan irritación en el tejido y la liberación de compuestos químicos tóxicos. Sin embargo, el principal interés para los efectos en la salud que provoca el hollín, es que comprende una matriz de carbono elemental con compuestos orgánicos e inorgánicos adsorbidos. Se ha demostrado que la producción de células formadoras de anticuerpos asociados al pulmón en ratas se ve afectada por la inhalación de emisiones de la combustión de diesel.

Se sabe que el hollín tiene propiedades irritantes, mutagénicas y carcinogénicas que dependen y varían con la dosis liberada. En relación con las características de los contaminantes, su acción sobre los diferentes sistemas biológicos depende de su naturaleza fisicoquímica, de su concentración en un tiempo determinado y del tiempo que los individuos están expuestos a estos contaminantes, trátase de seres humanos o de animales y plantas.

No obstante, existen diferentes tipos de elementos contaminantes en la atmósfera, los que con mayor frecuencia y más intensidad repercuten sobre la salud de la población y son los clasificados como de naturaleza química, como los hidrocarburos aromáticos (benceno, toluenos, etc) y las partículas suspendidas pequeñas, como las de carbón y otro tipo de compuestos derivados de la combustión y la quema de materiales orgánicos e inorgánicos.

Es importante considerar que entre las fuentes de producción de contaminantes peligrosos se encuentran el humo de tabaco, el humo proveniente de los vehículos motorizados y los vapores de productos para el hogar como pinturas, detergentes, limpieza.

El sistema respiratorio constituye la principal vía de entrada del material particulado en el organismo. La deposición de las partículas en diferentes partes del cuerpo humano depende del tamaño, forma y densidad de las partículas, así como de la respiración del individuo (nasal u oral). Posteriormente, los efectos que puede inducir el material particulado en el organismo dependen de la granulometría, la morfología y la composición química de las partículas, el tiempo de exposición y la susceptibilidad de cada persona. Todas las partículas de diámetro $<10 \mu\text{m}$ (PM_{10}) tienen un tamaño suficiente para penetrar en la región traqueó bronquial pero sólo aquellas de diámetro $<2.5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$) pueden alcanzar la cavidad alveolar y, por tanto, provocar mayores afecciones.

A partir de numerosos estudios epidemiológicos llevados a cabo en las décadas de 1980 y 1990 se han obtenido suficientes datos para afirmar que existe una correlación significativa entre la exposición al material particulado atmosférico y diversos efectos adversos sobre la salud. En estos estudios los niveles de material particulado han sido caracterizados de diferentes formas, incluyendo la concentración en masa total (Partículas en Suspensión Totales, PST), la concentración de algunas de sus fracciones (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1) (**Künzil N. et al., 2000**).

En estudios recientes se han desmarcado de la trayectoria seguida por estudios precedentes, que centraban su atención en el estudio de las fracciones más gruesas (PST y PM_{10}), para analizar los efectos de las partículas de menor diámetro. Concretamente, se centran en los efectos de la exposición a largo plazo a las fracciones más finas del material particulado. El mayor riesgo para la salud de la fracción $PM_{2.5}$ se relaciona con su mayor capacidad de penetración en el organismo y mayor reactividad química (**EPA, 1996**).

La principal conclusión alcanzada por estos estudios es la evidencia de una correlación significativa entre el incremento de la mortalidad y de los niveles de material particulado fino ($<2.5 \mu m$). El incremento de la mortalidad está directamente relacionado con afecciones cardiovasculares. Las partículas en suspensión totales (PST) y aquellas en el rango $PM_{2.5-10}$ no presentan una asociación significativa con la tasa de mortalidad (**Pope C. A., et al, 2002**).

Al margen del diámetro de partícula, los efectos en la salud del material particulado atmosférico dependen de su composición química. A pesar de que en la actualidad existen todavía incertidumbres acerca de los efectos provocados por las diferentes especies químicas, la mayoría de estudios apunta a que el mayor impacto en la salud viene causado por las partículas de carbono elemental (CE), compuestos orgánicos (MO, concretamente hidrocarburos aromáticos policíclicos), sulfatos y nitratos, partículas ultrafinas ($<0.1 \mu m$) y determinados metales (As, Cd,

Fe, Zn, Ni; **Wichmann H. E, y Peters A., 2000; WHO, 2003**). El hecho de que la mayoría de estas partículas se acumulen en la fracción $PM_{2.5}$ contribuye a incrementar sus efectos adversos sobre la salud.

2.6.1.- Vía de entrada al cuerpo humano

Según la organización mundial de la salud cada día necesitamos el equivalente a 20 m^2 de aire esto es siete mil veces más aire que agua, así que siendo el aire un recurso vital para los seres humanos, su contaminación puede dañar nuestra salud y vida.

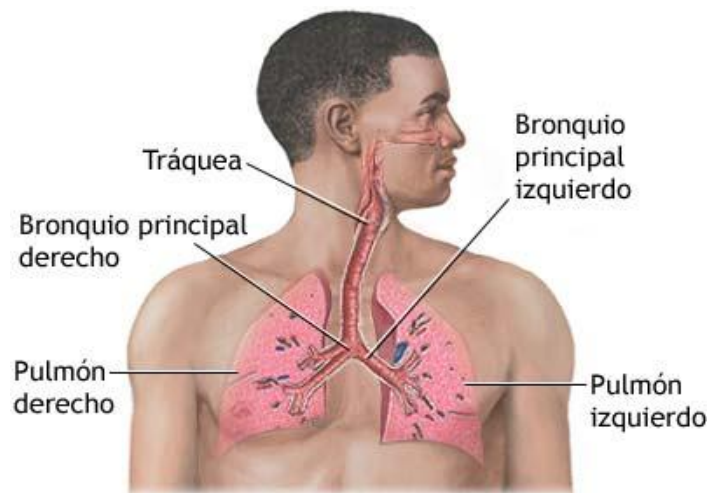


Figura 2.7.- Órganos internos que atraviesan las $PM_{2.5}$ en el cuerpo humano

Poniendo como ejemplo la **Figura 2.7**, las partículas se encuentran en el aire así que es normal que entren al cuerpo, los humanos pueden respirar por la nariz y la boca, el respirar por la boca hacen que las partículas viajen mucho más dentro de los pulmones, normalmente las PM_{10} no pasan más allá de la nariz ya que son atrapados por las mucosidades, pero las $PM_{2.5}$ si lo hacen, cuando han pasado la nariz, antes de llegar a la tráquea, las partículas muy grandes pueden adherirse a las paredes cercanas de la tráquea.

Al tener la tráquea un diámetro muy pequeño, solo logran entrar las partículas menores a $7\ \mu\text{m}$, dentro de la tráquea se retienen partículas pequeñas de 5 a $7\ \mu\text{m}$, gracias a que los pulmones producen mucosidad para atrapar a las partículas, y existen vellitos llamados epitelio cilíndrico pseudoestratificado y ciliado que se menean para mover la mucosidad y las partículas fuera del pulmón, esta mucosidad sale de las vías respiratorias al toser o al tragar, pasando la tráquea, llegan hasta los bronquios donde solo pueden pasar partículas desde 2 a $7\ \mu\text{m}$ de diámetro; aquí células especiales atrapan las partículas, si no logran atraparlas estas partículas llegan finalmente a los alvéolos.

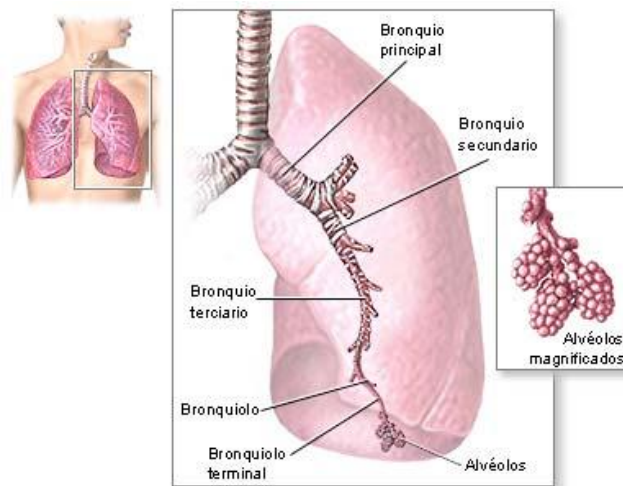


Figura 2.8.- Interior del pulmón humano donde se alojan las $\text{PM}_{2.5}$

Ya dentro de los alvéolos (**Figura 2.8**), Las partículas que alcanzan esta región pueden causar un daño potencial en la transferencia de partículas del pulmón a la circulación sanguínea y de esta a otros órganos. La depositación de partículas aumenta más rápidamente a ritmos respiratorios más altos, tales como cuando se hace ejercicio (**Chow J. C. y Watson J. G., 2006**).

A) Efectos a la salud por exposición en corto tiempo.

Los niños y adultos saludables pueden padecer síntomas temporales tales como: tos, opresión en el pecho, falta de aliento e irritación en los ojos, nariz y garganta.

La exposición a las partículas durante varias horas o por un día entero pueden exacerbar las enfermedades pulmonares, provocando ataques de asma y bronquitis aguda. La contaminación de partículas en el aire también puede aumentar la susceptibilidad a las infecciones respiratorias tales como catarro, gripe o bronquitis. Para la gente que tiene enfermedades del corazón, tales como enfermedad de las arterias coronarias e insuficiencia cardiaca congestiva, las exposiciones a corto plazo han sido ligadas a la isquemia, ataques cardíacos y arritmias cardíacas. **(CARB, 2007).**

B) Efectos a la salud por exposición en largo tiempo.

Los efectos causados por la exposición a altos niveles de material particulado durante varios años pueden ser similares a aquellos causados por exposición de corta duración. La función pulmonar puede disminuir en niños de edad escolar que estén expuestos a las partículas en combinación con otros contaminantes atmosféricos (dióxido de nitrógeno y vapores ácidos) por largos períodos de tiempo. Estos cambios en la función pulmonar no son reversibles y aceleran el deterioro del funcionamiento pulmonar que normalmente ocurre con la edad **(CARB, 2007).**

C) ¿Quién corre más riesgos ante la exposición a las partículas?

Los adultos mayores (60 años de edad o más) con enfermedades cardíacas o pulmonares tienen más posibilidad de sufrir efectos serios debido a exposiciones a material particulado de corta duración, comparado con los adultos saludables. Los estudios epidemiológicos han demostrado un aumento de mortalidad en personas con enfermedades del corazón o pulmonares unos días después de altos niveles de partículas. **(CARB, 2007).**

2.7.- Normas de calidad del aire

Las Normas Oficiales Mexicanas vigentes para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto a ozono (O₃), bióxido de azufre (SO₂), bióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de carbono (CO), partículas suspendidas totales (PST), partículas menores a 10 µm (PM₁₀), partículas menores a 2.5 µm (PM_{2.5}) y plomo (Pb). En la **Tabla 2.2** se dan a conocer.

Tabla 2.2.- Normas oficiales mexicanas para evaluar la calidad del aire ambiente (SINAICA, 2006)

Contaminante	Valores Límites			Normas Oficiales Mexicanas
	Exposición Aguda		Exposición Crónica (Para protección de la salud de la población susceptible)	
	Concentración y Tiempo Promedio	Frecuencia Máxima Aceptable		
Ozono (O ₃)	0.11 ppm (1 Hora) (216 µg/m ³)	1 vez al año	-	NOM-020-SSA1-1993
	0.08 ppm (8 horas)	Quinto máximo en un año		
Monóxido de Carbono (CO)	11 ppm (8horas) (12595 µg/m ³)	1 vez al año	-	NOM-021-SSA1-1993
Bióxido de Azufre (SO ₂)	0.13 ppm (24 horas) (341 µg/m ³)	1 vez al año	0.03 ppm (media aritmética anual)	NOM-022-SSA1-1993
Bióxido de Nitrógeno (NO ₂)	0.21 ppm (1 hora) (341 µg/m ³)	1 vez al año		NOM-023-SSA1-1993
Partículas Suspendidas Totales (PST)	210 µg/m ³ (percentil 98 promedio de 24 horas)	24 Horas		NOM-024-SSA1-1993
Partículas con diámetro menor a 10 µm (PM ₁₀)	120 µg/m ³ (percentil 98 promedio de 24 Horas)	24 Horas	50 µg/m ³ (promedio aritmético anual)	NOM-025-SSA1-1993
Partículas con diámetro menor a 2.5 µm (PM _{2.5})	65 µg/m ³ (percentil 98 promedio de 24 horas)	24 Horas	15 µg/m ³ (promedio aritmético anual)	NOM-025-SSA1-1993
Plomo (Pb)	-	-	1.5 µg/m ³ (promedio aritmético en 3 meses)	NOM-026-SSA1-1993

La mayoría de estas normas fueron emitidas en el año 1993 y han estado siendo actualizadas a medida que las circunstancias así lo requieren.

III.- MÉTODOS Y MATERIALES

3.1.- Método

3.1.1.- Campaña de monitoreo

El muestreo de la $PM_{2.5}$ se llevo a cabo en la zona urbana y rural de la ciudad de Mexicali, la cual tuvo una duración de cuatro semanas en verano - otoño (del 5 de Septiembre al 5 de Octubre del 2008) y de cuatro semanas en invierno (del 1^o de enero al 31 de enero del 2009), en el cual se usaron cuatro equipos de bajo volumen llamados “*Minivol*”, donde se utilizaron dos diferentes tipos de filtros: teflón y cuarzo. Estos equipos operaron a un flujo de 5 L/min por períodos de 24 horas.

Los monitores fueron colocados en dos lugares: uno en el techo del Instituto de Ingeniería, en la ciudad de Mexicali y otro en el techo de un rancho cercano a la delegación Guadalupe Victoria (**Figura 3.1**).



Figura 3.1.- Mapa de la ciudad de Mexicali y el Ejido Guadalupe Victoria



Figura 3.2.- Ubicación de los primeros dos monitores en el Instituto de Ingeniería



Figura 3.3.- Ubicación de los dos últimos monitores en un rancho cercano al ejido Guadalupe Victoria

Estos dos sitios fueron seleccionados como representativos del valle y ciudad de Mexicali (**Figura 3.2 y 3.3**) por motivos de aseguramiento del equipo y de los experimentos a realizar. Los muestreos se realizaron cada tercer día, esto significó que se tomaron 28 muestras en cada lugar de muestreo (14 con el filtro de teflón y 14 con el filtro de cuarzo), dando como resultado 56 muestras para la campaña de verano - otoño, mientras en la temporada de invierno se tomaron 32 muestras en cada lugar de muestreo (16 con el filtro de teflón y 16 con el filtro de cuarzo), dando como resultado 64 muestras para la campaña de invierno. El fundamento para realizar los muestreos en la ciudad y valle de Mexicali fue con el fin de comparar la abundancia de partículas $PM_{2.5}$ en cuanto a cantidad, características físicas y potenciabilidad química para la instrumentación de la cual se dispuso en el instituto y laboratorio de apoyo académico.

3.1.2.- Caracterización química

Tanto a los filtros de cuarzo como a los de teflón se les determinó la masa (gravimetría) y 38 metales (del Na al Pb) por EDX (espectroscopia de análisis de dispersión de rayos x).

3.2.- Materiales

3.2.1- Filtros

Filtros de cuarzo y teflón: Tienen un diámetro de 47 mm. Los filtros de teflón se caracterizan por ser resistente y capaces de soportar altas temperaturas, de hasta unos 300 °C, por períodos prolongados y sin sufrir ninguna clase de daño. Además son resistentes a gran parte de los ácidos y bases existentes, y resulta insoluble ante muchos de los disolventes orgánicos, además de contener cantidades altas de flúor al ser parte de un monómero ($CF_2=CF_2$). Los filtros de cuarzo son fabricados con micro fibras de cuarzo puras (SiO_2), con ausencia total de ligantes o aditivos, poseen características de retención, capacidad de carga y

permeabilidad al aire tienen mayor resistencia química a altas temperaturas, pueden ser utilizados en ambientes con condiciones extremas, permiten la determinación gravimétrica de los mismos (**Figura 3.4**).

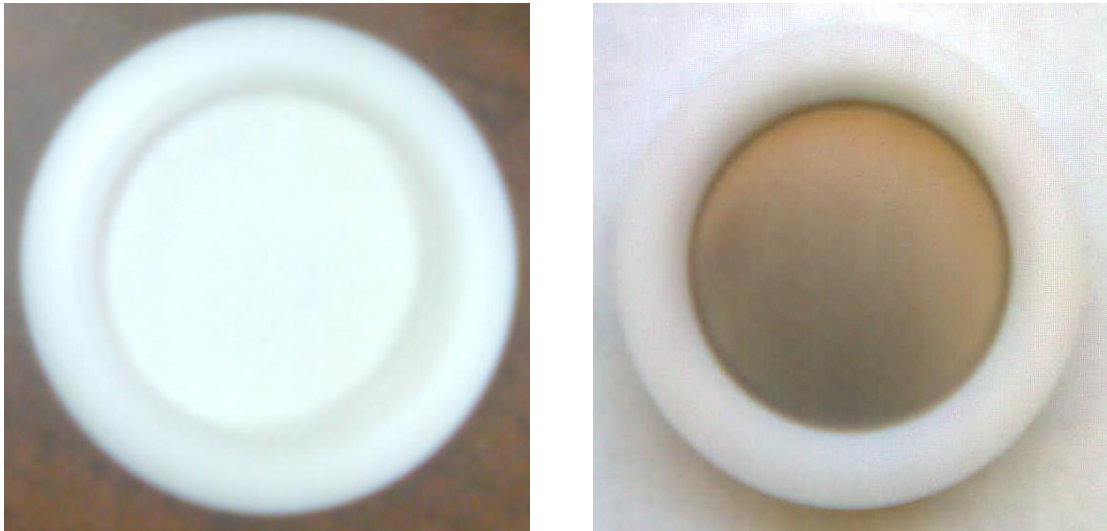


Figura 3.4.- Filtros de teflón y cuarzo dentro del anillo antigravitatorio.

3.3.- Equipos

Balanza analítica AND HM – 202 y Micro balanza Sartorius ME36S: Se utilizaron para pesar los filtros en la temporada de otoño e invierno, tanto al inicio y al final del muestreo, sus características principales es que puede pesar desde .0001 mg hasta 1 μ g, (**Figura 3.5**).



Figura 3.5.- Balanza Analítica y Micro balanza

3.3.1.- Muestreador de partículas con equipo de bajo volumen.

Es un muestreador de material particulado y de recolección de gases. Se diseñaron para la obtención de muestras de partículas atmosféricas, totales y fracción respirable (PM_{10} y $PM_{2.5}$) en sitios sin energía eléctrica o de difícil acceso (**Figura 3.6**). Da resultados muy cercanos a los métodos de referencia, funciona con carga de baterías portátiles, es ideal para llevar a cabo estudios de diagnóstico en microambiente, áreas laborales, áreas remotas o áreas que no cuentan con electricidad.

Este equipo cuenta con un controlador de tiempo programable de siete días, un sistema de controlador de flujo constante y un programador de tiempo electrónico. Sus baterías son recargables y está recubierta de material PVC para protegerlo de condiciones ambientales. El monitor es básicamente una bomba de succión con controlador de fluido y tiempo con un programa tal que se pueden realizar muestreos desde unos cuantos minutos hasta de una semana.



Figura 3.6.- Monitor de bajo volumen (“Minivol airmetrics”)

Funciona en el modo de muestreo de partículas suspendidas, conduciendo el aire ambiental por un tubo denominado modulo de impactación donde el aire es pasado a través de un filtro que puede ser de fibra de vidrio, cuarzo o un filtro de membrana de Teflón. El módulo de impactación lleva en su interior un seleccionador de partículas menores o iguales a 10 micrómetros de diámetro y el flujo de operación de la bomba de succión debe de ser 5 litros por minuto, para hacer pasar alrededor de 7 m³ de aire en 24 horas de muestreo. El equipo deberá ser calibrado cada 6 meses.

Al inicio de cada muestreo, se realizan las siguientes acciones, prueba de fugas en todo el sistema, medición, verificación del flujo de operación y finalmente se programan los tiempos de arranque y finalización del monitoreo. Una vez terminado el muestreo, se retira el impactador con el filtro muestreado y se coloca otro con un filtro blanco para efectuar el siguiente muestreo, así como el recambio de baterías cargadas. Se muestran en las **Figuras 3.7** el controlador de tiempo programable y la bomba de succión con controlador de fluido:

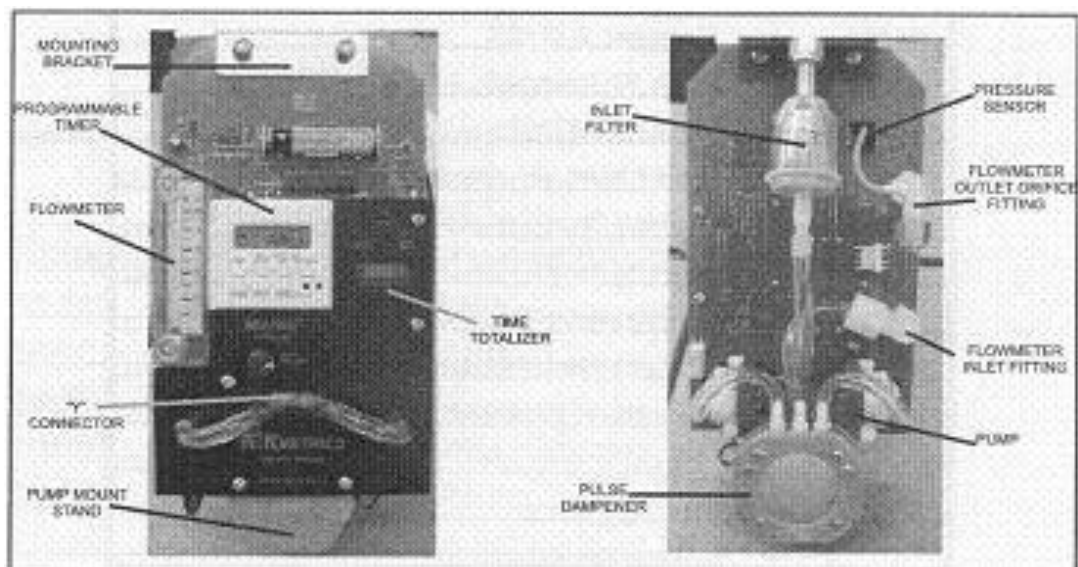


Figura 3.7.- Controlador de tiempo programable y la bomba de succión (Airmetrics, 2006)

A) Preparación del muestreador (cabezal)

Cabezal de PM_{2.5}: Se deberá utilizar dos preseparador de tipo PM₁₀ con dos adaptadores múltiple colocados en el ensamble del preseparador con un protector contra la lluvia para formar juntos un preseparador para PM_{2.5}. **(Figura 3.8).**



Figura 3.8.- Ensamblado del cabezal de PM_{2.5} con protección para la lluvia

B) Tasa de flujo

Diseñado para una tasa de flujo de aire de 5 lpm en condiciones ambientales. Debido a la que la densidad del aire, el comportamiento del flujómetro, la temperatura ambiental y la presión atmosférica son diferentes en cada muestreo, así deben de ser calculadas para cada muestreo.

I) Determinación de la tasa de flujo.

Para determinar el flujo final, es necesaria la siguiente ecuación (1):

$$Q_{fin} = (m_{vol} Q_{ini} + b_{vol}) \times \sqrt{\left(\frac{P_{std}}{P_{fin}}\right) \times \left(\frac{T_{fin}}{T_{std}}\right)} \quad (1)$$

Donde:

M_{vol} y B_{vol} , son constantes determinadas en cada máquina.

P_{std} : Presión atmosférica estándar (760 mm Hg)

T_{std} : Temperatura estándar (298 °K); P_{fin} : Presión atmosférica actual mm Hg.

T_{fin} : Temperatura actual, °K; Q_{fin} : Flujo actual, litros/min.

Q_{ini} : Flujo que indica el rotámetro. litros/min.

C) Manejo de los filtros.

Se debe ser cuidadoso en el manejo de los filtros, nunca se debe tocar directamente con las manos, para esto se debe transportar con unas pinzas con puntas de teflón.

I) Pesaje inicial del filtro.

Antes del pesaje del filtro es necesario apuntar los siguientes datos: fecha, temperatura, humedad relativa, la hora y la fecha.

II) Instalación de filtros.

El procedimiento debe realizarse en un laboratorio o en un área limpia. Los filtros deben tomarse de las orillas y se recomienda que sean tratadas con pinzas con puntas de teflón. Los filtros deben mantenerse en caja petri y nunca ser doblados ni estirados.

III) Ajuste del tiempo de muestreo deseado.

En cada operación del minivol en el sitio de muestreo se debe llevar a cabo permanentemente el ajuste del tiempo de acuerdo a lo planeado con anticipación.-

IV) Recuperación de la muestra de partículas.

En cuanto se termina el muestreo, el operario debe recoger la muestra obtenida, de lo contrario el filtro se puede dañar o puede suceder un cambio de masas debido a pérdida de partículas o puede incrementarse la volatilización si el filtro se deja por tiempo prolongados. En la hoja de datos se debe anotar la temperatura y presión ambiental así como la lectura en el fluviómetro. Si la presión y la temperatura no pueden ser medidas, se puede utilizar la temperatura y presión promedio para la zona. Después se procede al pesaje del filtro temporalmente después de una ambientalización de 24 horas.

V) Masa particulada

- La determinación de la masa particulada o análisis gravimétrico es la diferencia de peso entre el pesaje final y el pesaje inicial (Ecuación 2) obteniendo de esta manera la masa particulada depositada en el filtro.
- El siguiente paso es determinar el flujo total, lo cual se logra sumando el flujo inicial más el flujo final entre 2 (Ecuación 3).

- La masa particulada deberá ser multiplicada por 10^6 para que se tenga en μg (Ecuación 4).
- La masa particulada ya multiplicada por 10^6 deberá dividirse al flujo total, dando como resultado la concentración total de $\text{PM}_{2.5}$, este se reportara al público en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Ecuación 5).

VI) Fórmulas para sacar la concentración de $\text{PM}_{2.5}$:

La ecuación (2) determina el peso de la masa particulada:

$$P_1: W_2 - W_1 \quad (2)$$

La ecuación (3) determina el flujo total del muestreo:

$$V_{\text{pat}}: (V_{\text{fin}} + V_{\text{ini}})/2 \quad (3)$$

La ecuación (4) determina la masa particulada en μg :

$$P_2: (P_1 * 10^6) \quad (4)$$

La ecuación (5) da la concentración de $\text{PM}_{2.5}$:

$$\text{CtPM}_{2.5}: (P_2)/(V_{\text{pat}}) \quad (5)$$

Donde:

w_1 : Peso inicial en gramos; w_2 : Peso final en gramos

v_{pat} : Volumen patrón en m^3 ; v_{fin} : Volumen final en m^3

v_{ini} : Volumen inicial en m^3 ; P_1 : Peso total en gramos

P_2 : Peso total en microgramos; $\text{CtPM}_{2.5}$: Concentración total de $\text{PM}_{2.5}$

VII) Cuidados

Si los filtros van a ser analizados posteriormente por el laboratorio, entregarlos al responsable, si no se puede analizar conservarlo en refrigeración a $4\text{ }^\circ\text{C}$ por un

periodo no mayor a 30 días, si únicamente se va a realizar el análisis gravimétrico basta con mantener el filtro en su sobre debidamente protegido de la luz y de la humedad hasta por 30 días.

3.3.2.- Métodos analíticos

Los métodos que se emplean para el análisis químico de las muestras se dividen en:

Gravimétrico: La masa se determina por diferencia de peso de los filtros, antes y después del muestreo. Los filtros se pesan en una micro balanza con una sensibilidad de ± 0.002 mg (INE, 1999).

Espectroscopia de análisis de dispersión de rayos X (EDX): La mayoría de los electrones incidentes interactúan con los átomos de la muestra y son dispersados elástica e inelásticamente; en la primera la trayectoria del electrón cambia, pero su energía cinética y velocidad permanece esencialmente constante y en la inelástica, la trayectoria del electrón incidente es ligeramente perturbada, pero pierde energía a causa de su interacción con los electrones de la muestra. Las interacciones inelásticas son las causantes de la emisión de rayos X; los electrones de las capas internas de la muestra, son removidos por causa de los electrones incidentes, dejando vacantes que son ocupadas por los electrones de las capas externas, que emiten una radiación característica (rayos X).

Estos rayos X son analizados y se registra el número de fotones en función de la energía, obteniéndose gráficos que muestran picos cuyas posiciones brindan información sobre los átomos presentes y cuyas áreas son proporcionales a la cantidad de dichos átomos en la muestra, obteniéndose información sobre la composición de la misma. Dado que los haces de luz incidentes tienen alta energía (típicamente 0.5-30 kV) penetran en la muestra distancias del orden de algunas micras y, por tanto, debe tenerse siempre presente que la composición

obtenida corresponde a una capa de algunas micras y no meramente a la superficie. La instrumentación para EDX es usualmente un accesorio de los microscopios electrónicos de barrido (**Cobo J.M., 2006**).

3.3.3.- Rosa de los vientos

A) Definición

El viento está definido como "el aire en movimiento" y se describe por dos características: 1) la velocidad y 2) la dirección. Los meteorólogos crearon una gráfica llamada "*Rosa de los vientos*" (**Figura 3.9**), que nos permite representar simultáneamente la relación que existe entre las características que componen el viento. La información de cada rosa de viento muestra la:

- 1) Frecuencia de ocurrencia de los vientos en 16 sectores de dirección (N, NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSO, SO, OSO, O, ONO, NO, NNO).
- 2) Identificación de la estación, mes y periodo de registro.
- 3) Porcentaje de frecuencia de viento en calma.

La rosa de los vientos se usa para representar gráficamente la dirección de transporte dominante de los vientos de un área, debido a las influencias locales de terreno, posibles efectos de costa, exposición de los instrumentos y variabilidad temporal del viento.

La estadística de la rosa de vientos puede no ser siempre representativa de los vientos de un área. Otras condiciones meteorológicas pueden ser también importantes para determinar la formación y transporte de ciertos contaminantes atmosféricos (**SINAICA, 2007**).

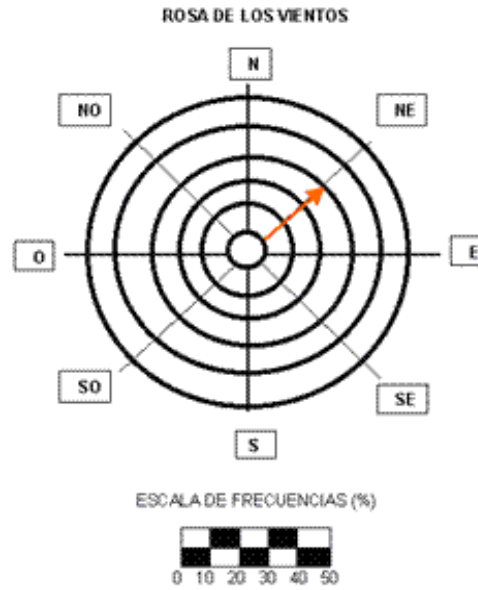


Figura 3.9.- Rosa de los Vientos

En las estaciones meteorológicas se utiliza generalmente la veleta y el anemómetro para conocer los valores correspondientes a la dirección y la velocidad del viento respectivamente. Observar en la **Tabla 3.1** que al construir una rosas de vientos se siguen los mismos pasos que al hacer una tabla de frecuencias, pero ahora manejando dos o más rasgos de interés. Aquí una categoría es la dirección y sus subcategorías son los 16 rumbos, la otra categoría es la velocidad y utilizamos los diferentes tipos de viento considerados por Beaufort como las subcategorías. Esta tabla permite crear la rosa de los vientos como un método gráfico de presentación conjunta de las distribuciones de frecuencia de la fuerza (velocidad) y dirección del viento (**SINAICA, 2007**).

Tabla 3.1.- Ejemplo de frecuencias utilizadas para las Rosas de Viento

M/s	Dirección del Viento															Totales	
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW		NNW
0	7	10	4	3	2	11	5	1	1	4	6	4	1	1	3	3	66
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	9	1	0	0	1	1	3	1	0	6	0	0	1	0	1	0	24
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Totales	16	11	4	3	3	12	8	2	1	10	6	4	2	1	4	3	90

En la “rosa de los vientos” del mes de agosto del 2006 de la estación de monitoreo de la UABC en Mexicali (**Figura 3.10**), la velocidad del viento tuvo rangos de 5.7 a 8.8 m/s, el 30% del viento provenía del oeste, con algunas rachas que venían del suroeste y del noroeste. Esto hace pensar que las partículas que llegan a Mexicali en verano provendrían de lo que es la Rumorosa en el oeste, y probablemente de los campos de cultivos del Noroeste.

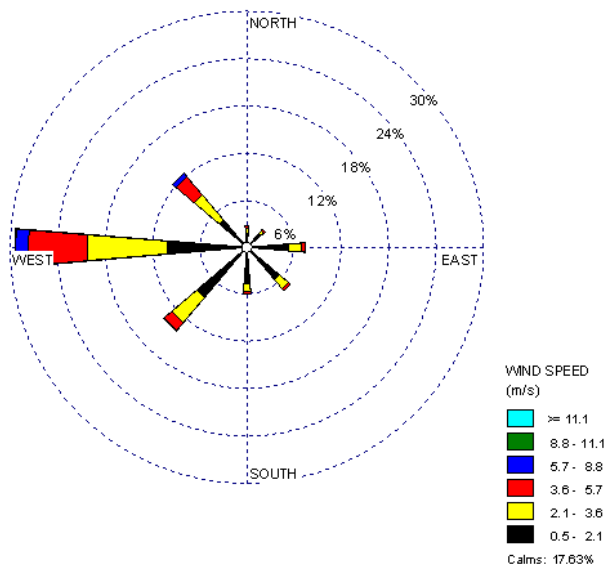


Figura 3.10.- Rosa de los vientos de Agosto del 2006

En lo que se refiere a la “rosa de los vientos” de del mes de febrero del 2006 para la estación de monitoreo de la UABC en Mexicali (**Figura 3.11**), la velocidad del

viento estuvo entre los 5.7 a los 8.8 m/s, y según la dirección de los vientos hacen pensar que los remanentes de contaminación provenientes de los campos de cultivos del Valle del Valle Imperial acarrean material particulado hacia la ciudad, ocasionando que haya altas concentraciones de $PM_{2.5}$. A esto hay que agregarle el polvo arenoso proveniente de la Mesa de Andrade que contamina las colonias aledañas del Este de Mexicali.

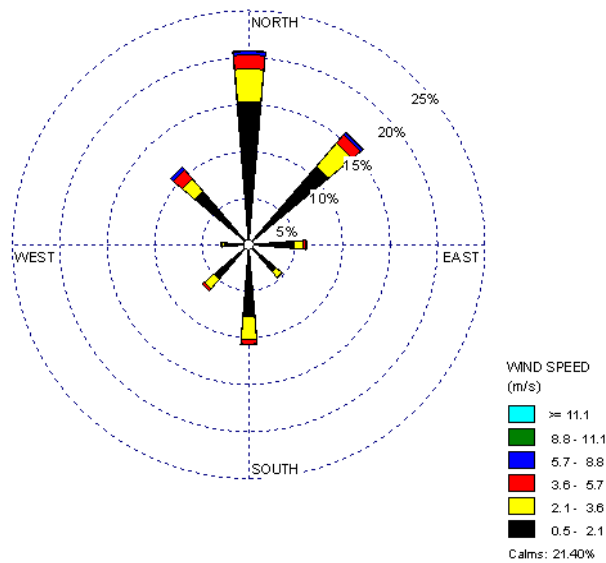


Figura 3.11.- Rosa de los vientos de febrero del 2006

IV.- RESULTADOS

El principal objetivo de este capítulo ha sido la interpretación de la variabilidad de los niveles de material particulado atmosférico en las dos zonas seleccionadas (zona urbana y zona rural de Mexicali) para dos temporadas: verano – otoño y invierno, con énfasis en los registros elevados de $PM_{2.5}$.

4.1- Resultados de la campaña de verano - otoño.

Preparación de los filtros.

Para usar los filtros se requirió que se ambientalizarán, para que no tuvieran humedad debido a que se almacenaron un tiempo dentro de sus cajas, esto se llevó a cabo en un desecador por 24 horas, ya ambientalizados los filtros, se llevo a cabo el pesaje.

Condiciones meteorológicas

Las condiciones meteorológicas observadas durante toda la campaña se dividieron en cuatro etapas:

- La primer etapa fue del 5 al 9 de septiembre donde en algunos rumbos de la área urbana y la área rural se presentaron pequeñas tormentas de arena (**Figura 4.1**), sobre todo en la zona del valle de Mexicali donde la mayoría de los caminos son de terracería que agravo la situación, en tanto que en la ciudad la cercanía a una obra en construcción ayudo a que hubiera más contaminación en la zona, además de la contribución proveniente del tráfico vehicular del boulevard Benito Juárez. En ese periodo los rangos de temperatura variaron entre 32 a 38 °C en lo que se refiere a la ciudad, mientras en el valle los rangos de temperatura estuvieron entre 33 a 36 °C, en cambio la humedad relativa para estos días en lo que se refiere a la

zona urbana tuvo rangos de 19 a 36 %, mientras en la zona rural los rangos fueron de 25 a 47 %.



Figura 4.1.- Tormenta de arena en el valle de Mexicali

- La segunda etapa fue del 11 de septiembre llovió en la región ocasionando que se depositara el polvo que provenía principalmente de las carreteras sin pavimento y de las tormentas de arena que azotan la región, se tuvo una precipitación de 17.5 mm con una temperatura de 26.6 °C y una humedad relativa de 56% en lo que se refiere a la zona rural, para la zona urbana se tomo una temperatura de 28 °C y una humedad relativa de 59.3%, con una precipitación de 7.5 mm, en ese día, el muestreo no se realizo.
- La tercera etapa fue del 12 al 23 de septiembre, en la zona urbana, donde los rangos de temperatura fueron de 29 a 34 °C, mientras los rangos de humedad relativa fueron de 18 a 56 %, en esta zona se noto que la mayoría de los caminos presentaban encharcamientos, impidiendo esto que hubiera polvo en el aire, mientras en la zona rural, los rangos de temperatura fueron de 27 a 32 °C y con la humedad relativa fue de 25 a 52 %, esto nos dice que la temperatura disminuyo respecto a la primera etapa de la

investigación, probablemente debido a la lluvia del día 11 de septiembre, además que los caminos de la zona rural no presentaban problemas de levantamiento de polvo, como lo habían hecho anteriormente, el problema surgió en los últimos días de dicha etapa, donde se empezó con la operación de los hornos de ladrillos que están cercanos a la zona de muestreo del valle de Mexicali, contaminando el lugar debido a que se usa en mayoría madera (**Figura 4.2**), además de que empezaron las quemas de residuos agrícolas.



Figura 4.2.- Hornos de ladrillos del valle de Mexicali

- Por último, la cuarta etapa fue del 25 de septiembre al 3 de octubre, donde los rangos de temperatura en la zona urbana fueron de 31 a 35 °C, con unos rangos de humedad relativa de 18 a 43 %, aquí se observó que se hacían quemas en lotes baldíos, así como en casas particulares, además de los embotellamientos diarios, mientras en la zona rural se tuvieron unos rangos de temperatura de 30 a 34 °C, mientras los rangos de humedad relativa fueron de 22 a 45 %, en esta última etapa se observó que en la mayoría de los campos de cultivos había quema de residuos, además que la mayoría de la gente quemaba la basura dentro de su casa.

Al finalizar el muestreo se procedió a ambientalizar por 24 horas los filtros usados, sobre todo para que los filtros no fueran contaminados en el laboratorio o se perdiera material debido al manejo.

En las zonas urbanas e industriales las emisiones locales se diluyen relativamente respecto al invierno debido a las condiciones atmosféricas que favorecen la dispersión, como consecuencia del mayor espesor de la capa de mezcla. Al mismo tiempo, estas mismas condiciones atmosféricas dispersivas favorecen el transporte de los contaminantes emitidos en zonas urbanas e industriales hasta las zonas rurales, y es por ello que es en el periodo estival cuando las estaciones rurales registran los mayores niveles de partículas. Asimismo, en el verano la resuspensión de material particulado (por las circulaciones convectivas) es mayor que en invierno tanto en las zonas rurales como en las urbanas e industriales. Por último, en verano se producen periodos largos sin precipitación, durante los cuales no se producen los procesos de lavado de contaminantes atmosféricos característicos del invierno (Viana R., 2003)

4.1.1.- Resultados de la zona rural.

A) Análisis gravimétrico.

En la **Tabla 4-1** se dan los resultados para los filtros de cuarzo y su análisis gravimétrico:

Tabla 4.1.- Análisis gravimétrico para los filtros de cuarzo

No de Filtro:	Peso Inicial:	Peso Final:	Diferencia de Peso
Rur - 01 - Cua	0.1454	0.14735	0.001950
Rur - 02 - Cua	0.1473	0.14875	0.001450
Rur - 03 - Cua	0.1447	0.145075	0.000375
Rur - 04 - Cua	0.148	0.14825	0.000250
Rur - 05 - Cua	0.1449	0.145475	0.000575
Rur - 06 - Cua	0.1475	0.14765	0.000150
Rur - 07 - Cua	0.1463	0.14645	0.000150
Rur - 08 - Cua	0.1447	0.14495	0.000250
Rur - 09 - Cua	0.145	0.14545	0.000450
Rur - 10 - Cua	0.1475	0.1479	0.000400
Rur - 11 - Cua	0.14606	0.146575	0.000515
Rur - 12 - Cua	0.14476	0.145225	0.000465
Rur - 13 - Cua	0.1464	0.146875	0.000475
Rur - 14 - Cua	0.1463	0.146875	0.000575

En la **Tabla 4-2** se dan los resultados para los filtros de teflón y su análisis gravimétrico:

Tabla 4.2.- Análisis gravimétrico para los filtros de teflón

No de Filtro:	Peso Inicial:	Peso Final:	Diferencia de Peso:
Rur - 01 - Tef	0.1404	0.1407	0.000300
Rur - 02 - Tef	0.1401	0.139125	-0.000975
Rur - 03 - Tef	0.1399	0.14005	0.000150
Rur - 04 - Tef	0.1395	0.1396	0.000100
Rur - 05 - Tef	0.1402	0.140525	0.000325
Rur - 06 - Tef	0.1406	0.140625	0.000025
Rur - 07 - Tef	0.1402	0.140225	0.000025
Rur - 08 - Tef	0.1406	0.141125	0.000525
Rur - 09 - Tef	0.1403	0.140825	0.000525
Rur - 10 - Tef	0.1408	0.141125	0.000325
Rur - 11 - Tef	0.1396	0.14015	0.000550
Rur - 12 - Tef	0.14008	0.1407	0.000620
Rur - 13 - Tef	0.1398	0.139825	0.000025
Rur - 14 - Tef	0.14106	0.1411	0.000040

Se observa como el filtro 2 tiene un dato negativo, esto se debió a que el filtro perdió material cuando este era usado.

Al tener los resultados del análisis gravimétrico se procedió a calcular el flujo final. Para esto se necesitaron las siguientes constantes del muestreador que se uso para cada filtro, en este caso fueron las siguientes:

Para el muestreador con filtro de teflón:

m_{vol} : 0.9652; b_{vol} : 0.5934 y Q_{ini} : 5 L/min

Para el muestreador con filtro de cuarzo:

m_{vol} : 1.0219; b_{vol} : -0.2059 y Q_{ini} : 5 L/min

Otros datos usados fueron la presión atmosférica (P_{atm}) y temperatura ambiental (T_{amb}), que fueron obtenidos en la estación de monitoreo de CONAGUA en el ejido nuevo león.

En las **Tablas 4.3 y 4.4** se muestran los resultados sacados de flujo final en los filtros de cuarzo y teflón.

Tabla 4.3.- Q_{fin} (flujo patrón) del muestreador que contenía el filtro de cuarzo en la zona rural

Pact	Pest	Tact	Test	(MvolQind + Bvol)	Pres atm 1	Tem Atm 1	PA * TA	(PA * TA) ^{1/2}	Qact
1004.5	1013	35.7	24.85	4.9036	1.0085	1.4366	1.4488	1.2037	6.1073
1004.1	1013	33.9	24.85	4.9036	1.0089	1.3642	1.3763	1.1731	6.0767
1005.1	1013	30.3	24.85	4.9036	1.0079	1.2193	1.2289	1.1086	6.0122
1008	1013	29.6	24.85	4.9036	1.0050	1.1911	1.1971	1.0941	5.9977
1009.4	1013	32.4	24.85	4.9036	1.0036	1.3038	1.3085	1.1439	6.0475
1012.7	1013	29.9	24.85	4.9036	1.0003	1.2032	1.2036	1.0971	6.0007
1010.2	1013	31	24.85	4.9036	1.0028	1.2475	1.2509	1.1185	6.0221
1008.5	1013	28.6	24.85	4.9036	1.0045	1.1509	1.1560	1.0752	5.9788
1010.9	1013	31.6	24.85	4.9036	1.0021	1.2716	1.2743	1.1288	6.0324
1009.7	1013	32.3	24.85	4.9036	1.0033	1.2998	1.3040	1.1419	6.0455
1009.1	1013	32.2	24.85	4.9036	1.0039	1.2958	1.3008	1.1405	6.0441
1012	1013	33.1	24.85	4.9036	1.0010	1.3320	1.3333	1.1547	6.0583
1008.4	1013	31.2	24.85	4.9036	1.0046	1.2555	1.2613	1.1231	6.0267
1006.9	1013	25.1	24.85	4.9036	1.0061	1.0101	1.0162	1.0081	5.9117

Tabla 4.4.- Qfin flujo patrón) del muestreo que contenía el filtro de teflón en la zona rural

Pact	Pest	Tact	Test	(MvolQind + Bvol)	Pres atm 1	Tem Atm 1	PA * TA	(PA * TA)1/2	Qact
1004.5	1013	35.7	24.85	5.4194	1.0085	1.4366	1.4488	1.2037	6.6231
1004.1	1013	33.9	24.85	5.4194	1.0089	1.3642	1.3763	1.1731	6.5925
1005.1	1013	30.3	24.85	5.4194	1.0079	1.2193	1.2289	1.1086	6.5280
1008	1013	29.6	24.85	5.4194	1.0050	1.1911	1.1971	1.0941	6.5135
1009.4	1013	32.4	24.85	5.4194	1.0036	1.3038	1.3085	1.1439	6.5633
1012.7	1013	29.9	24.85	5.4194	1.0003	1.2032	1.2036	1.0971	6.5165
1010.2	1013	31	24.85	5.4194	1.0028	1.2475	1.2509	1.1185	6.5379
1008.5	1013	28.6	24.85	5.4194	1.0045	1.1509	1.1560	1.0752	6.4946
1010.9	1013	31.6	24.85	5.4194	1.0021	1.2716	1.2743	1.1288	6.5482
1009.7	1013	32.3	24.85	5.4194	1.0033	1.2998	1.3040	1.1419	6.5613
1009.1	1013	32.2	24.85	5.4194	1.0039	1.2958	1.3008	1.1405	6.5599
1012	1013	33.1	24.85	5.4194	1.0010	1.3320	1.3333	1.1547	6.5741
1008.4	1013	31.2	24.85	5.4194	1.0046	1.2555	1.2613	1.1231	6.5425
1006.9	1013	25.1	24.85	5.4194	1.0061	1.0101	1.0162	1.0081	6.4275

Una vez que se obtiene el flujo final se procede a sacar la concentración de partículas menores a 2.5 micrómetros, para lo cual se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\text{Flujo Patrón: } F_{\text{ptn}} = (Q_{\text{ini}} + Q_{\text{fin}})/2 \quad (1)$$

El flujo patrón (1) es la cantidad de aire promedio que ha entrado hacia la bomba de succión del muestreador en el transcurso de 24 horas.

$$\text{CtPM}_{2.5}: ((W_2 - W_1)10^6)/(F_p) \quad (2)$$

La concentración de $\text{PM}_{2.5}$ (2) es la división de la diferencia de peso entre el flujo final, todo esto multiplicado por 10^6 para poder expresarlo en micrómetros sobre metros cúbicos.

En las **Tablas 4.5 y 4.6** se dan las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ en los filtros de cuarzo y teflón, así como el proceso mediante el cual se obtuvieron.

Tabla 4.5.- Concentraciones de las PM_{2.5} en el filtro de cuarzo para la zona rural

Fecha	F. Inicial	Q act	F patron	Dif. De Peso	Peso Patron	Flujo patron2	mg/l	mg/m3
05-sep-08	5	6.1073	5.5536	0.001950	1950	7997.2209	0.2438	243.8347
07-sep-08	5	6.0767	5.5384	0.001450	1450	7975.2587	0.1818	181.8123
09-sep-08	5	6.0122	5.5061	0.000375	375	7928.7534	0.0473	47.2962
12-sep-08	5	5.9977	5.4989	0.000250	250	7918.3442	0.0316	31.5723
14-sep-08	5	6.0475	5.5237	0.000575	575	7954.1892	0.0723	72.2890
16-sep-08	5	6.0007	5.5003	0.000150	150	7920.4867	0.0189	18.9382
18-sep-08	5	6.0221	5.5110	0.000150	150	7935.8799	0.0189	18.9015
20-sep-08	5	5.9788	5.4894	0.000250	250	7904.7313	0.0316	31.6266
23-sep-08	5	6.0324	5.5162	0.000450	450	7943.3541	0.0567	56.6511
25-sep-08	5	6.0455	5.5228	0.000400	400	7952.7951	0.0503	50.2968
27-sep-08	5	6.0441	5.5221	0.000515	515	7951.7654	0.0648	64.7655
29-sep-08	5	6.0583	5.5291	0.000465	465	7961.9685	0.0584	58.4026
01-oct-08	5	6.0267	5.5133	0.000475	475	7939.1942	0.0598	59.8297
03-oct-08	5	5.9117	5.4558	0.000575	575	7856.3933	0.0732	73.1888

Como se observa en la tabla anterior (**Tabla 4.5**) hubo cuatro violaciones a la norma mexicana de 65 µg/m³, estas fechas el día 5 de septiembre con 243.83 µg/m³, la segunda el día 7 de septiembre con 181.81 µg/m³, el tercer día que se violó fue el 14 de septiembre con 72.28 µg/m³ y por último el día 3 de octubre con 73.18 µg/m³.

Tabla 4.6.- Concentraciones de las PM_{2.5} en el filtro de teflón para la zona rural

Fecha	Flujo Ini	Q act	F pat	Dif de Peso	Peso Patron	Flujo pat2	mg/l	mg/m3
05-sep-08	5	6.6231	5.8115	0.000300	300	8368.5969	0.0358	35.8483
07-sep-08	5	6.5925	5.7963	-0.000975	-975	8346.6347	-0.1168	-116.8135
09-sep-08	5	6.5280	5.7640	0.000150	150	8300.1294	0.0181	18.0720
12-sep-08	5	6.5135	5.7568	0.000100	100	8289.7202	0.0121	12.0631
14-sep-08	5	6.5633	5.7816	0.000325	325	8325.5652	0.0390	39.0364
16-sep-08	5	6.5165	5.7582	0.000025	25	8291.8627	0.0030	3.0150
18-sep-08	5	6.5379	5.7689	0.000025	25	8307.2559	0.0030	3.0094
20-sep-08	5	6.4946	5.7473	0.000525	525	8276.1073	0.0634	63.4356
23-sep-08	5	6.5482	5.7741	0.000525	525	8314.7301	0.0631	63.1410
25-sep-08	5	6.5613	5.7807	0.000325	325	8324.1711	0.0390	39.0429
27-sep-08	5	6.5599	5.7800	0.000550	550	8323.1414	0.0661	66.0808
29-sep-08	5	6.5741	5.7870	0.000620	620	8333.3445	0.0744	74.3999
01-oct-08	5	6.5425	5.7712	0.000025	25	8310.5702	0.0030	3.0082
03-oct-08	5	6.4275	5.7137	0.000040	40	8227.7693	0.0049	4.8616

Para el filtro de teflón (**Tabla 4.6**) de la zona rural solo un día se violó la norma mexicana siendo este el 29 de septiembre con 74.39 µg/m³.

Así mismo se muestra la **Figuras 4.1** y **4.2** con las concentraciones para PM_{2.5} con el filtro de cuarzo y el filtro de teflón:

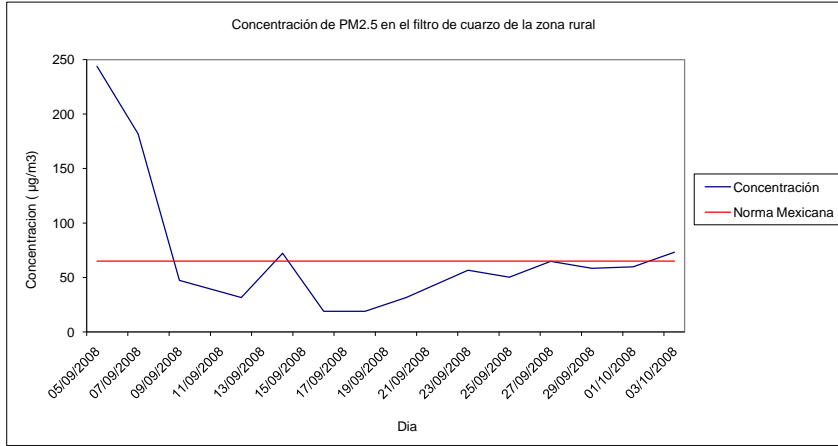


Figura 4.3.- Concentración de PM_{2.5} con el filtro de cuarzo para la zona rural

En la **Figura 4.3** se observa que en los primeros días de muestreo la concentración de PM_{2.5} estuvo por arriba de la norma mientras que los días después que llovió se mantuvo la mayor parte del tiempo debajo de la norma mexicana.

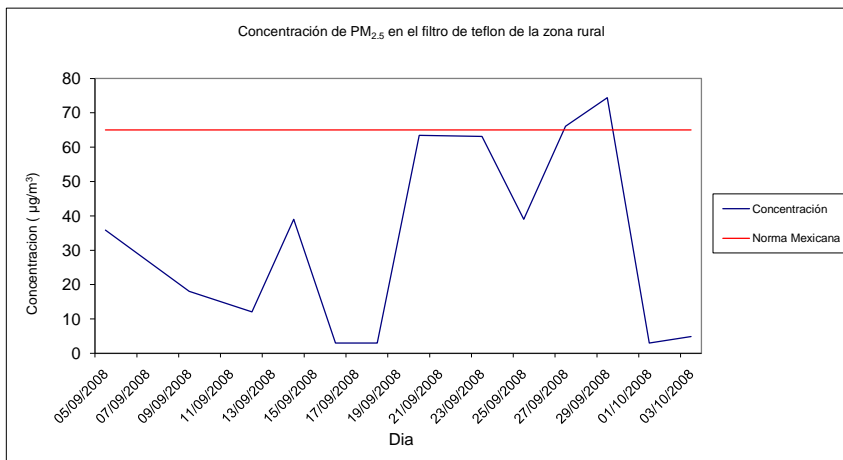


Figura 4.4.- Concentración de PM_{2.5} con el filtro de teflón para la zona rural

En la **Figura 4.4** se observó un incremento después del 27 de septiembre aunque los últimos días bajo a casi cero.

B) Análisis químico.

Después del análisis gravimétrico los filtros se acomodaron en un refrigerador para que mantuvieran a una misma temperatura. Se seleccionaron los filtros con más peso de la zona rural, que podrían ser las muestras representativas de los días más contaminados de la zona rural, estos fueron analizados con el método EDX (Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X):

I) Filtro de teflón:

Este filtro se tomó el día 29 de septiembre y peso .620 mg con una concentración de $PM_{2.5}$ de $74.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En la **Figura 4.5** se muestra el tamaño de las partículas que contiene el filtro de teflón. Estas varían de 4 a 11 μm .

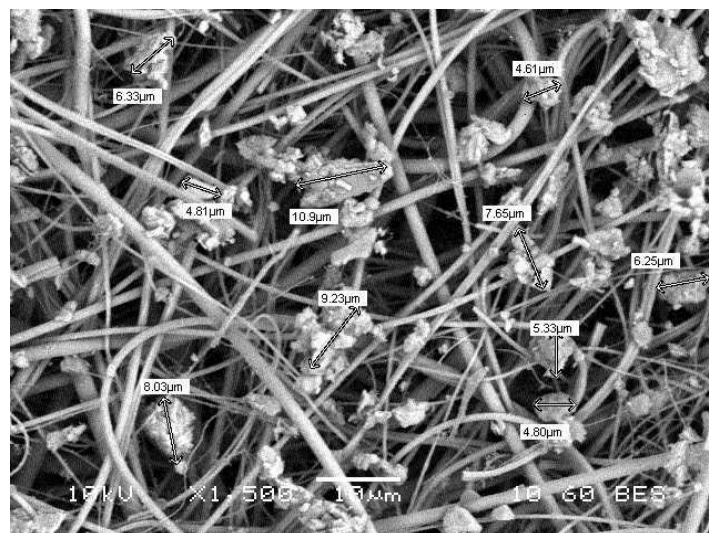


Figura 4.5.- Tamaño de las partículas contenidas en el filtro de teflón para el día 29 de septiembre de la zona rural

Lo siguiente fue buscar mediante el método EDX los diferentes elementos que puedan componer las partículas dentro del filtro.

Tabla 4.7.- Elementos encontrados en el filtro de teflón de la zona rural

Elemento	% Masa	% Atómico
C	09.35	14.93
O	41.62	49.90
F	04.28	04.32
Mg	06.09	04.80
Al	08.83	06.28
Si	26.65	18.20
K	03.18	01.56

En la **Tabla 4.7** se destaca el oxígeno con 41%, el silicio 27% y el carbono con 9%, siendo el principal elemento que surge de la quema de residuos agrícolas o de la combustión de los automóviles.

Las principales diferencias entre elementos es de donde provengan estos y el nivel de daño que puedan producir en la gente, el carbón que es un elemento que se encuentra en casi todas partes, suele ser producto de quemas de residuos, quema de madera, y aquellas que salen de los mofles de los automóviles, además de estar presente en la gasolina. El oxígeno segundo elemento que se encuentra en la atmosfera después del nitrógeno su permanencia en el filtro se debe a su interacción con el medio. El flúor se le ha asociado a las características del filtro, que es más que todo un polímero, llamado tetrafluoretileno ($CF_2=CF_2$). El magnesio se asocia principalmente en sales y óxidos, además que es muy usado en la agricultura, construcción e industrias químicas, la aleación magnesio – aluminio se emplea en envases de bebidas, además que se emplea en componentes de las llantas de los automóviles. El aluminio es uno de los principales elementos sobre la tierra, se encuentra en casi todas partes, en la tierra forma principalmente aluminosilicatos (polvo característico de la región), además de que es usado en el transporte, aparatos eléctricos, etc. El silicio es uno de los metales más abundantes en la tierra, se presenta principalmente en arenas y arcillas, se usa en

agricultura (fertilizante), vidrio, etc. El potasio como nitrato se usa como fertilizante, además de que la tierra presenta niveles altos de potasio.

En la **Figura 4.6** se muestra el espectro de dispersión de energía donde aparecen simultáneamente todas las transiciones asociadas a los elementos químicos presentes que es más que todo un fotón de rayos X característico del átomo cada elemento, en el eje X se muestra la energía dispersada en KeV.

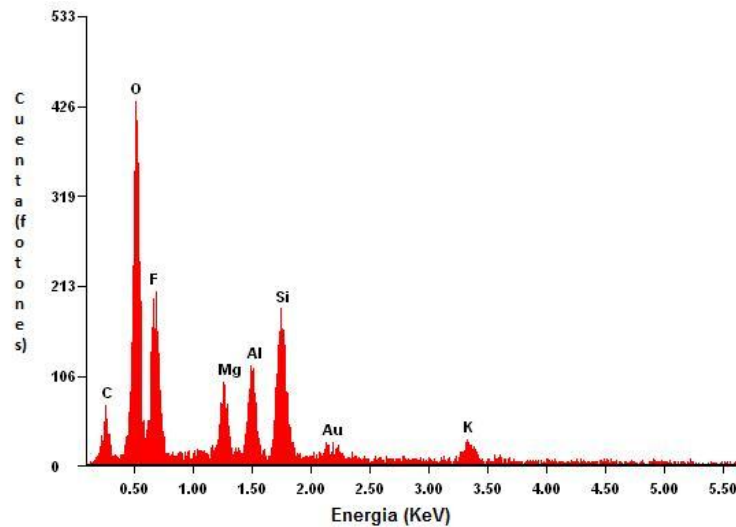


Figura 4.6.- Espectro de dispersión de energía del filtro de teflón de la zona rural

II) Filtro de cuarzo:

Este filtro se tomó el día 5 de septiembre el cual tuvo un peso de 1.95 mg con una concentración de $PM_{2.5}$ de $243.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En la **Figura 4.7** se muestra el tamaño de las partículas que contiene el filtro de cuarzo capturadas durante la campaña de verano, que fue observada en un microscopio electrónico de barrido, el tamaño de las partículas van desde los $4.8 \mu\text{m}$ hasta los $13.8 \mu\text{m}$.

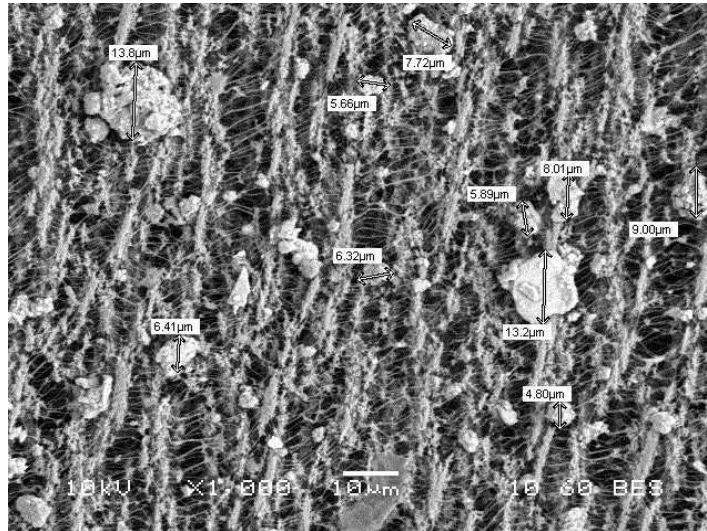


Figura 4.7.- Tamaño de las partículas contenidas en el filtro de cuarzo de la zona rural para el día 5 de septiembre del 2008

Se muestran los elementos que pudieran contener las partículas dentro del filtro.

Tabla 4.8.- Elementos encontrados en el filtro de cuarzo de la zona rural

Elemento	% Masa	% Atómico
C	19.44	29.57
O	26.97	30.81
F	16.42	15.80
Na	01.06	00.84
Mg	02.42	01.82
Al	08.10	05.49
Si	20.44	13.30
K	02.29	01.07
Ca	02.86	01.30

El análisis hecho con el método EDX a una serie de partículas previamente contenidas en el filtro de cuarzo se describe en la **Tabla 4.8**. Se muestra que en el filtro de cuarzo destaca la presencia de oxígeno con 27%, en menor proporción el silicio, el caso del oxígeno y el silicio se debe a la aleación para formar el filtro, el cual es SiO_2 , aunque también el hecho de haber silicio es por el hecho de que el polvo del lugar tiene grandes cantidades de silicio, con un 20% de carbono y el fluor en un 17% de la masa de la partícula. Así mismo resulta importante resaltar

que aparecen elementos que no tenía el filtro de teflón como es el sodio, que se presenta en aleación con el potasio (NaK), además se usa en aleación al plomo en la gasolina, además de encontrarse en el óxido NaO_2 . Mientras el calcio se encuentra presente en sulfatos (aljez, alabastro) y carbonatos (calcita, mármol, caliza y dolomita) a partir de los cuales se obtienen la cal viva, la escayola, el cemento, etc.; otros minerales que lo contienen son Fluorita (fluoruro), apatito (fosfato) y granito (silicato), mientras en la **Figura 4.8** nos muestra el espectro de dispersión de energía.

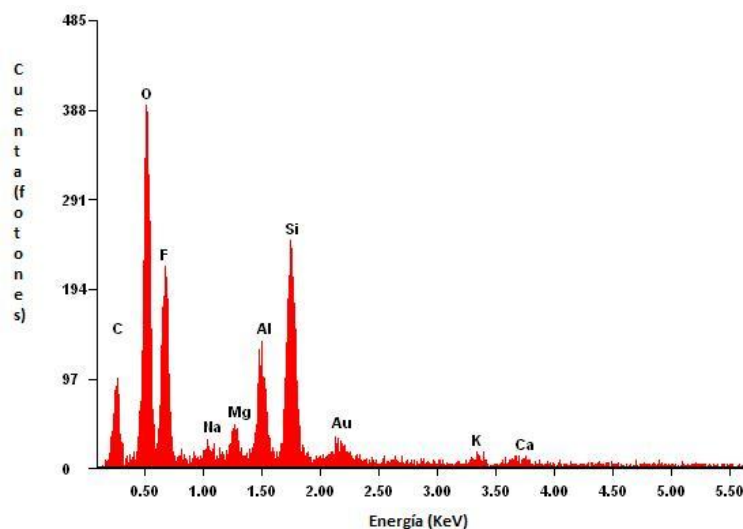


Figura 4.8.- Espectro de dispersión de energía del filtro de cuarzo de la zona rural

C) Análisis meteorológico

Se pretende ver la relación que existe entre las cuatro variables estudiadas durante el muestreo y la concentración de $\text{PM}_{2.5}$, para esto se elaboró un conjunto de figuras con la finalidad de ver si las variables meteorológicas son las causantes del aumento o disminución de la contaminación de la región.

Para esto se usan la temperatura del aire (T_a), la velocidad del viento (V_v) y la humedad relativa (H_r), que se cuantificaron durante el transcurso de la investigación. Para esto se comparara directamente una variable atmosférica contra la concentración de $\text{PM}_{2.5}$ para buscar una causa del descenso o aumento

de estas partículas. Estos datos fueron tomados de la estación meteorológica de la CONAGUA en el Ejido Nuevo León.

I) Filtro de cuarzo

En la **Figura 4.9** se muestra una comparación entre la concentración de $PM_{2.5}$ y la temperatura del aire, donde se muestra que la temperatura del aire no provoca que se modifique la concentración de $PM_{2.5}$, mientras en la **Figura 4.10** se muestra la comparación entre la concentración de $PM_{2.5}$ y la velocidad del viento donde se muestra que en algunos días cuando la velocidad del viento aumenta, la concentración de $PM_{2.5}$ disminuye, pero otros días parece no ser suficiente la fuerza del viento como para cambiar la concentración de material particulado en la región, en la **Figura 4.11** se muestra la relación de la concentración $PM_{2.5}$ y la humedad relativa, siendo la variable que mas afecto a la concentración de material particulado en la región según la figura.

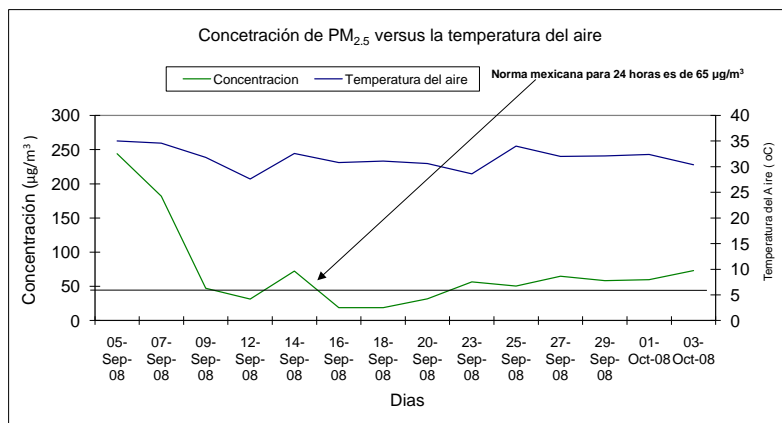


Figura 4.9.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la temperatura del aire para el filtro de cuarzo para la zona rural

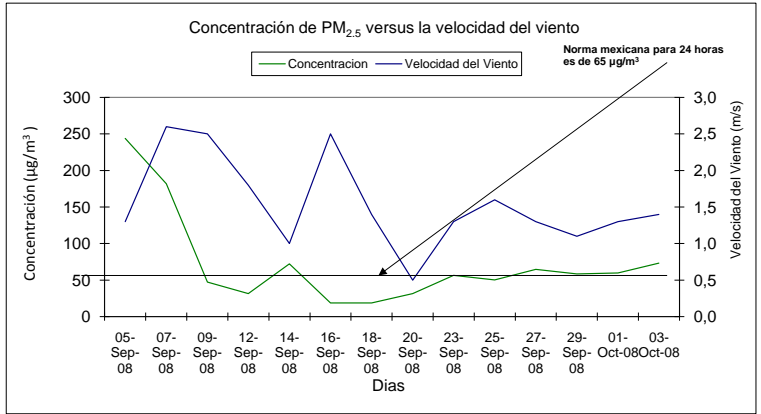


Figura 4.10.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la velocidad del viento para el filtro de cuarzo para la zona rural

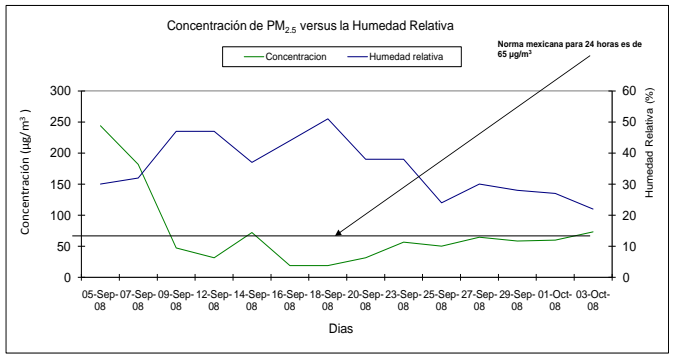


Figura 4.11.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la humedad relativa para el filtro de cuarzo para la zona rural

II) Filtro de teflón

A pesar que las imágenes son muy parecidas debido a que las variables atmosféricas fueron las mismas que en el filtro de cuarzo, se agregan las imágenes donde se muestra el comportamiento de la concentración de $PM_{2.5}$ frente a las tres variables atmosféricas.

En la **Figura 4.12** se observa una comparación entre las $PM_{2.5}$ y la temperatura del aire, que no parece influir en la concentración del material particulado, en la **Figura 4.13** se muestra una comparación entre las $PM_{2.5}$ y la velocidad del viento, que parece ser unos de las variables que más afectan a la concentración, ya que en algunos días cuando la velocidad sube, la concentración disminuye, eso tal vez se deba a que el viento transporta el material particulado fuera de la región, mientras en la **Figura 4.14** se da una comparación de $PM_{2.5}$ y la humedad relativa, donde a diferencia del filtro de cuarzo, no muestra indicios de que la humedad relativa modifique la concentración.

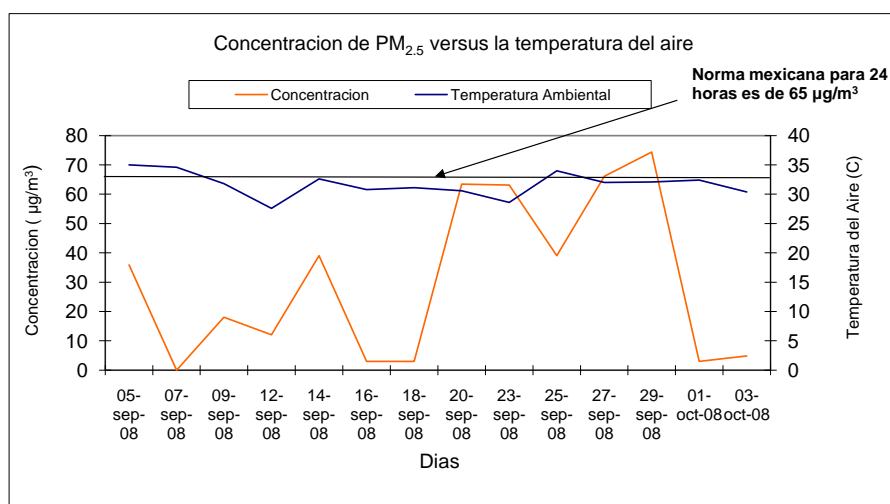


Figura 4.12.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la temperatura del aire para el filtro de teflón para la zona rural

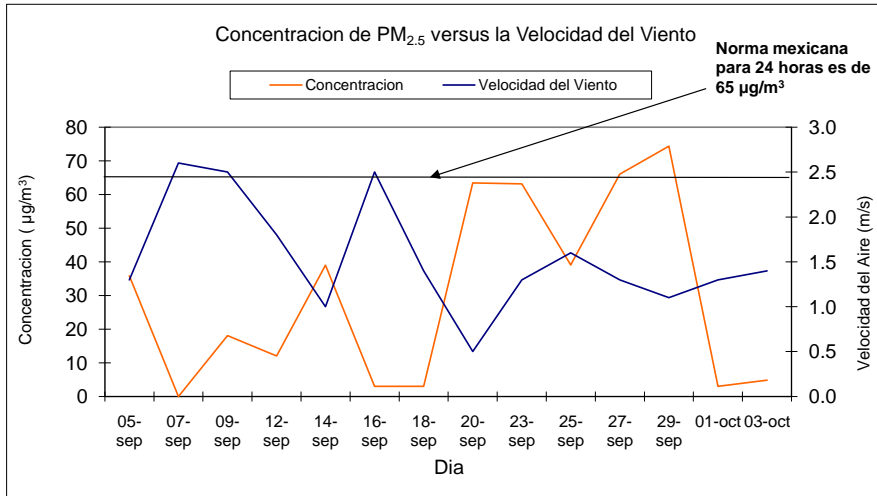


Figura 4.13.- Concentración de PM_{2.5} contra la velocidad del viento para el filtro de teflón para la zona rural

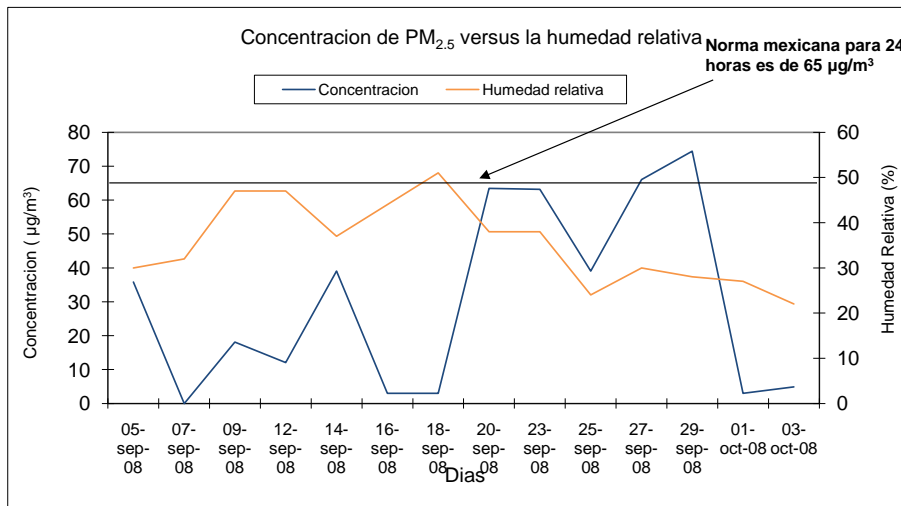


Figura 4.14.- Concentración de PM_{2.5} contra la humedad relativa para el filtro de teflón para la zona rural

Rosa de los vientos

En el mes de septiembre la dirección de los vientos provenían principalmente del sur – sureste, y del este – sureste, la velocidad máxima fue de 3.3 m/s y la velocidad promedio de 1.6 m/s (**Figura 4.15**). En cambio en el mes de octubre se registraron vientos en la dirección noroeste y norte – noroeste con una velocidad máxima de 3.4 m/s y una velocidad promedio de 1.9 m/s (**Figura 4.16**), cabe resaltar que los datos que se usaron para realizar la rosa de los vientos de octubre van del 1^{ro} de octubre al 10 de octubre es decir no comprende todos los datos del mes y puede no ser representativa del mes de octubre.

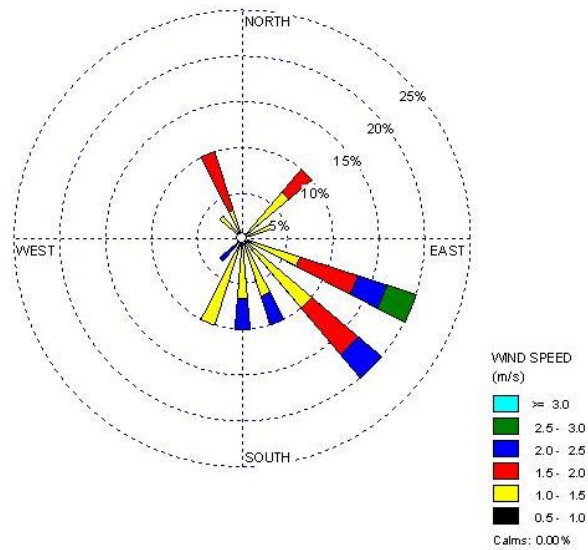


Figura 4.15.- Rosa de los vientos del mes de septiembre del 2008 para la zona rural

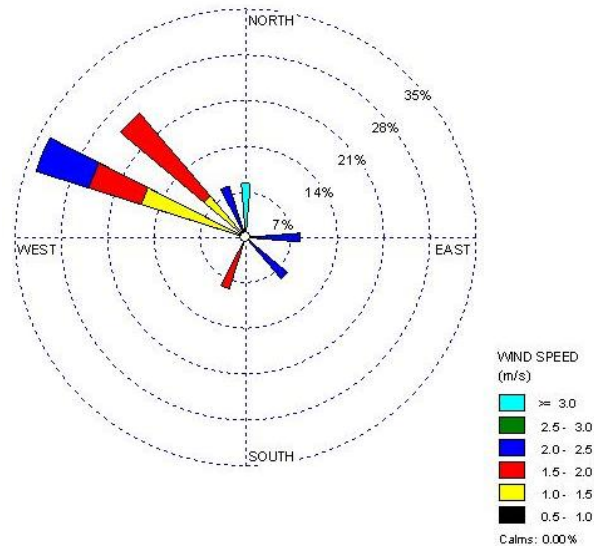


Figura 4.16.- Rosa de los vientos del mes de octubre del 2008 para la zona rural

Una potencial explicación sobre el origen de las partículas de acuerdo a la rosa de los vientos analizadas (**Figura 4.15 y 4.16**) para septiembre sería la quema de residuos de los campos agrícolas que están alrededor de la zona de muestreo y que pudo ser transportada a la ciudad, así como del arrastre de material de las zonas desérticas y del mismo mar. Para octubre la dirección del viento es totalmente opuesta eso hace pensar que la contaminación que llega al valle puede venir de la misma ciudad y de campos de cultivos que estén al noroeste de la zona de muestreo, al parecer la contaminación de los hornos de las ladrilleras del valle no llegan a la zona del muestreo debido a que se ubican al sur del ej. Guadalupe victoria.

D) Análisis Estadístico

l) Filtro de cuarzo

Para la zona rural con el filtro de cuarzo se tomaron presión ambiental, temperatura ambiental y humedad relativa para esto se obtuvo una determinación de 0.814 con un nivel de confianza de 95 %, Las R^2 de las dos variables

independientes más altas fueron: la presión atmosférica con la determinación más alta con: 0.471 (**Figura 4.17a**), 0.3685 para la temperatura ambiental (**Figura 4.17b**) y como la más baja a la humedad relativa con 0.157. La presión ambiental ayudó a explicar la razón por la cual hubo una determinación alta en el lugar, además de que por primera vez se muestra a la humedad relativa como significativa en un filtro en la temporada de otoño.

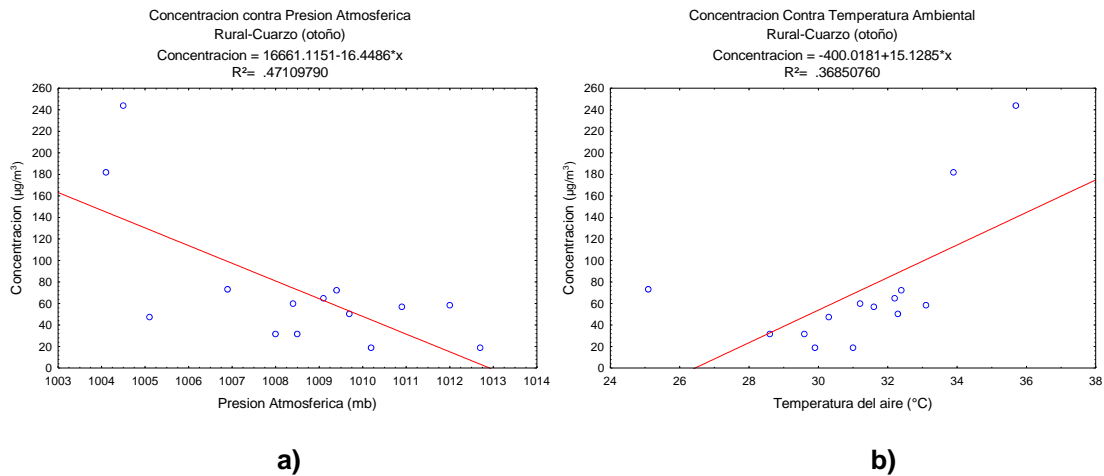


Figura 4.17.- a) Determinación de la concentración de PM_{2.5} contra presión atmosférica para la zona rural; b) Determinación de la concentración de PM_{2.5} contra temperatura del aire para la zona rural

II) Filtro de teflón

Con el filtro de teflón se tomaron las mismas variables independientes que con el filtro de cuarzo con una determinación en conjunto de 0.4732 con un nivel de confianza de 95 %. Las R² de las dos variables independientes más altas fueron: la presión ambiental con 0.0479 siendo la más baja, la temperatura ambiental con 0.165 (**Figura 4.18a**) y la velocidad del viento con 0.3203 (**Figura 4.18b**), siendo la que tiene la determinación más alta. La interacción de las tres variables independientes influye en las PM_{2.5}.

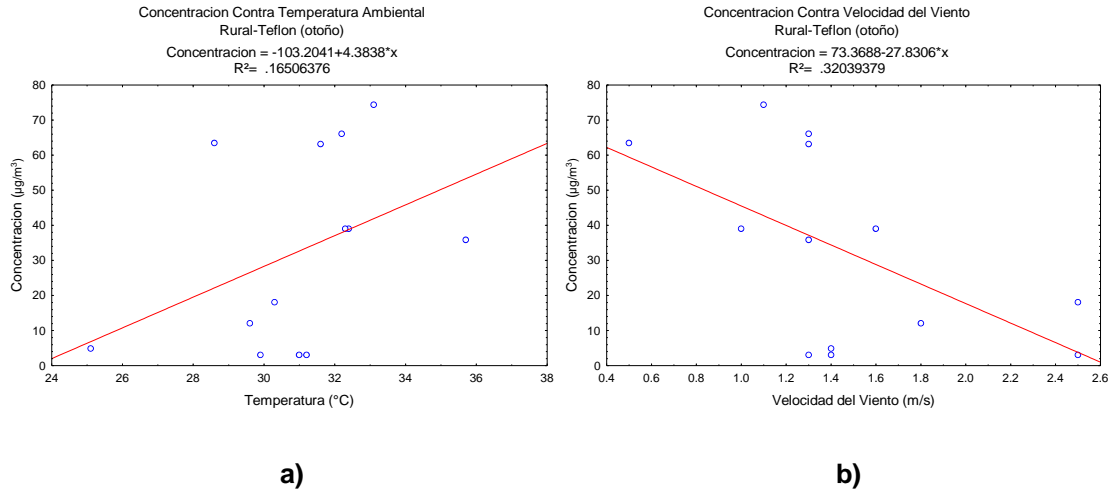


Figura 4.18.- a) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra temperatura del aire para la zona rural; b) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra velocidad del viento para la zona rural

Así para la zona rural las variables de las cuales se puede resumir que influenciaron la concentración de $PM_{2.5}$ fueron la presión ambiental y la velocidad del viento para el filtro de teflón, mientras en el caso del filtro de cuarzo la humedad relativa puede que haya sido la más influyente.

4.1.2.- Resultados de la zona urbana.

A) Análisis gravimétrico.

En la **Tabla 4.9** se dan los resultados para los filtros de cuarzo y su análisis gravimétrico:

Tabla 4.9.- Análisis gravimétrico para los filtros de cuarzo de la zona urbana

No de Filtro:	Peso Inicial:	Peso Final:	Diferencia de Peso:
Urb - 01 - Cua	0.1458	0.1459	0.000100
Urb - 02 - Cua	0.1459	0.146075	0.000175
Urb - 03 - Cua	0.1474	0.147875	0.000475
Urb - 04 - Cua	0.1484	0.148675	0.000275
Urb - 05 - Cua	0.1465	0.14705	0.000550
Urb - 06 - Cua	0.1468	0.1471	0.000300
Urb - 07 - Cua	0.1452	0.14565	0.000450
Urb - 08 - Cua	0.1452	0.145575	0.000375
Urb - 09 - Cua	0.1454	0.145675	0.000275
Urb - 10 - Cua	0.1462	0.14655	0.000350
Urb - 11 - Cua	0.14476	0.146625	0.001865
Urb - 12 - Cua	0.14358	0.145075	0.001495
Urb - 13 - Cua	0.14274	0.1441	0.001360
Urb - 14 - Cua	0.14442	0.143375	-0.001045

En **Tabla 4.10** se dan los resultados para los filtros de teflón y su análisis gravimétrico:

Tabla 4.10.- Análisis gravimétrico para los filtros de teflón para la zona urbana

No de Filtro:	Peso Inicial:	Peso Final:	Diferencia de Peso:
Urb - 01 - Tef	0.1402	0.140525	0.000325
Urb - 02 - Tef	0.1406	0.139925	-0.000675
Urb - 03 - Tef	0.1408	0.14115	0.000350
Urb - 04 - Tef	0.1404	0.1406	0.000200
Urb - 05 - Tef	0.1406	0.1411	0.000500
Urb - 06 - Tef	0.1404	0.140875	0.000475
Urb - 07 - Tef	0.1388	0.139	0.000200
Urb - 08 - Tef	0.1396	0.13985	0.000250
Urb - 09 - Tef	0.1398	0.139825	0.000025
Urb - 10 - Tef	0.1413	0.141575	0.000275
Urb - 11 - Tef	0.1407	0.1409	0.000200
Urb - 12 - Tef	0.13992	0.1403	0.000380
Urb - 13 - Tef	0.14052	0.1409	0.000380
Urb - 14 - Tef	0.14058	0.14085	0.000270
Urb - 15 - Tef	0.14068	0.1407	0.000020

Al tener los resultados del análisis gravimétrico se procedió a sacar el flujo final. Se usaron las siguientes constantes del muestreador, las cuales son las siguientes:

Para el muestreador con filtro de cuarzo:

m_{vol} : 0.9854; b_{vol} : 0.5487 y Q_{ini} : 5 L/min

Para el muestreador con filtro de teflón:

m_{vol} : 1.0015; b_{vol} : 0.4064 y Q_{ini} : 5 L/min

Otros datos usados fueron la presión atmosférica y temperatura ambiental, que fueron sacados de la estación de monitoreo de la UABC en Mexicali.

En las **Tablas 4.11 y 4.12** se muestran los resultados sacados de flujo final en los filtros de cuarzo y teflón.

Tabla 4.11.- Qfin (flujo patrón) del muestreador que contenía el filtro de cuarzo para la zona urbana.

Pact	Pest	Tact	Test	(MvolQind + Bvol)	Pres Atm 1	Tem atm 1	PA * TA	(PA * TA)1/2	Qact
1014	1013	34.48	24.85	5.4757	0.9990	1.3873	1.3860	1.1773	6.4464
1013	1013	31.35	24.85	5.4757	1.0000	1.2616	1.2616	1.1232	6.1503
1015	1013	29.57	24.85	5.4757	0.9980	1.1898	1.1875	1.0897	5.9669
1017	1013	27.62	24.85	5.4757	0.9961	1.1113	1.1070	1.0521	5.7611
1019	1013	30.26	24.85	5.4757	0.9941	1.2176	1.2105	1.1002	6.0244
1022	1013	29.27	24.85	5.4757	0.9912	1.1777	1.1674	1.0804	5.9162
1020	1013	31.28	24.85	5.4757	0.9931	1.2589	1.2502	1.1181	6.1226
1018	1013	25.77	24.85	5.4757	0.9951	1.0369	1.0318	1.0158	5.5621
1021	1013	29.91	24.85	5.4757	0.9922	1.2036	1.1941	1.0928	5.9836
1019	1013	30.74	24.85	5.4757	0.9941	1.2371	1.2298	1.1090	6.0724
1020	1013	31.94	24.85	5.4757	0.9931	1.2854	1.2766	1.1298	6.1867
1020	1013	31.21	24.85	5.4757	0.9931	1.2559	1.2472	1.1168	6.1153
1019	1013	31.71	24.85	5.4757	0.9941	1.2760	1.2685	1.1263	6.1671
1017	1013	25.93	24.85	5.4757	0.9961	1.0436	1.0395	1.0196	5.5828

Tabla 4.12.- Qfin (flujo patrón) del muestreador que contenía el filtro de teflón para la zona urbana.

Pact	Pest	Tact	Test	(MvolQind + Bvol)	Pres atm 1	Tem Atm 1	PA * TA	(PA * TA)1/2	Qact
1014	1013	34.48	24.85	5.4139	0.9990	1.3873	1.3860	1.1773	6.5912
1013	1013	31.35	24.85	5.4139	1.0000	1.2616	1.2616	1.1232	6.5371
1015	1013	29.57	24.85	5.4139	0.9980	1.1898	1.1875	1.0897	6.5036
1017	1013	27.62	24.85	5.4139	0.9961	1.1113	1.1070	1.0521	6.4660
1019	1013	30.26	24.85	5.4139	0.9941	1.2176	1.2105	1.1002	6.5141
1022	1013	29.27	24.85	5.4139	0.9912	1.1777	1.1674	1.0804	6.4943
1020	1013	31.28	24.85	5.4139	0.9931	1.2589	1.2502	1.1181	6.5320
1018	1013	25.77	24.85	5.4139	0.9951	1.0369	1.0318	1.0158	6.4297
1021	1013	29.91	24.85	5.4139	0.9922	1.2036	1.1941	1.0928	6.5067
1019	1013	30.74	24.85	5.4139	0.9941	1.2371	1.2298	1.1090	6.5229
1020	1013	31.94	24.85	5.4139	0.9931	1.2854	1.2766	1.1298	6.5437
1020	1013	31.21	24.85	5.4139	0.9931	1.2559	1.2472	1.1168	6.5307
1019	1013	31.71	24.85	5.4139	0.9941	1.2760	1.2685	1.1263	6.5402
1017	1013	25.93	24.85	5.4139	0.9961	1.0436	1.0395	1.0196	6.4335
1021	1013	24.03	24.85	5.4139	0.9922	0.9668	0.9592	0.9794	6.3933

Una vez que se cuenta con el flujo final se procede a sacar la concentración de partículas menores a 2.5 micrómetros.

En las **Tablas 4.13 y 4.14** se dan las concentraciones de PM_{2.5} en los filtros de teflón y cuarzo.

Tabla 4.13.- Concentraciones de las PM_{2.5} en el filtro de cuarzo para la zona urbana

Fecha	Flujo ini	Flujo fin	Flujo Pat	Dif de Peso	Peso patron	Flujo pat2		mg/m3
05-sep-08	5	6.4464	5.7232	0.000100	100	8241.376817	0.012134	12.1339
07-sep-08	5	6.1503	5.5751	0.000175	175	8028.205007	0.021798	21.7981
09-sep-08	5	5.9669	5.4835	0.000475	475	7896.173681	0.060156	60.1557
12-sep-08	5	5.7611	5.3806	0.000275	275	7748.000703	0.035493	35.4930
14-sep-08	5	6.0244	5.5122	0.000550	550	7937.595785	0.069291	69.2905
16-sep-08	5	5.9162	5.4581	0.000300	300	7859.659174	0.03817	38.1696
18-sep-08	5	6.1226	5.5613	0.000450	450	8008.289362	0.056192	56.1918
20-sep-08	5	5.5621	5.2810	0.000375	375	7604.689964	0.049312	49.3117
23-sep-08	5	5.9836	5.4918	0.000275	275	7908.210391	0.034774	34.7740
25-sep-08	5	6.0724	5.5362	0.000350	350	7972.10196	0.043903	43.9031
27-sep-08	5	6.1867	5.5934	0.001865	1865	8054.432369	0.23155	231.5495
29-sep-08	5	6.1153	5.5576	0.001495	1495	8003.00188	0.186805	186.8049
01-oct-08	5	6.1671	5.5835	0.001360	1360	8040.309927	0.169148	169.1477
03-oct-08	5	5.5828	5.2914	-0.001045	-1045	7619.595612	-0.137146	-137.1464

En la **Tabla 4.13** con el filtro de cuarzo en la zona urbana se excedió la norma varias veces, la primera vez fue el día 14 de septiembre con 69.29 µg/m³, la segunda vez el 27 de septiembre con 231.54 µg/m³, el tercer día el 29 de septiembre con 186.8 µg/m³ y el cuarto día el 1 de octubre con 169.14 µg/m³.

Tabla 4.14.- Concentraciones de las PM_{2.5} en el filtro de teflón para la zona urbana

Fecha	Flujo Ini	Q act	F patron	Dif de Peso	Peso Pat	Flujo pat2	mg/l	mg/m3
05-sep-08	5	6.5912	5.7956	0.000325	325	8345.639685	0.038942491	38.9425
07-sep-08	5	6.5371	5.7685	-0.000675	-675	8306.709172	-0.081259616	-81.2596
09-sep-08	5	6.5036	5.7518	0.000350	350	8282.596944	0.042257278	42.2573
12-sep-08	5	6.4660	5.7330	0.000200	200	8255.536846	0.024226165	24.2262
14-sep-08	5	6.5141	5.7571	0.000500	500	8290.161658	0.060312455	60.3125
16-sep-08	5	6.4943	5.7472	0.000475	475	8275.92848	0.057395373	57.3954
18-sep-08	5	6.5320	5.7660	0.000200	200	8303.072076	0.02408747	24.0875
20-sep-08	5	6.4297	5.7148	0.000250	250	8229.364715	0.030379016	30.3790
23-sep-08	5	6.5067	5.7533	0.000025	25	8284.795149	0.003017576	3.0176
25-sep-08	5	6.5229	5.7614	0.000275	275	8296.46335	0.033146654	33.1467
27-sep-08	5	6.5437	5.7719	0.000200	200	8311.498945	0.024063048	24.0630
29-sep-08	5	6.5307	5.7654	0.000380	380	8302.106449	0.045771516	45.7715
01-oct-08	5	6.5402	5.7701	0.000380	380	8308.919834	0.045733983	45.7340
03-oct-08	5	6.4335	5.7167	0.000270	270	8232.08686	0.032798488	32.7985
05-oct-08	5	6.3933	5.6967	0.000020	20	8203.176412	0.00243808	2.4381

Con el filtro de teflón (**Tabla 4.14**) en la zona urbana no hubo violaciones, las diferencias respecto a la concentración capturada por los dos diferentes filtros aun cuando estaban los muestreadores en el mismo lugar tal vez tengan que ver con las diferentes características del filtro.

Así mismo se ponen las **Figuras 4.19** y **4.20** de concentración para $PM_{2.5}$ con los filtros de cuarzo y teflón usados:

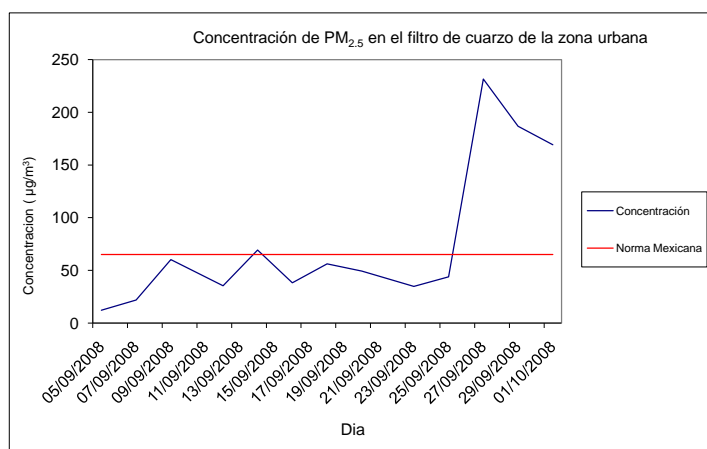


Figura 4.19.- Concentración de $PM_{2.5}$ con el filtro de cuarzo de la zona urbana

En la **Figura 4.20** se observa como la concentración de $PM_{2.5}$ se mantiene abajo del límite impuesto por la norma mexicana de $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

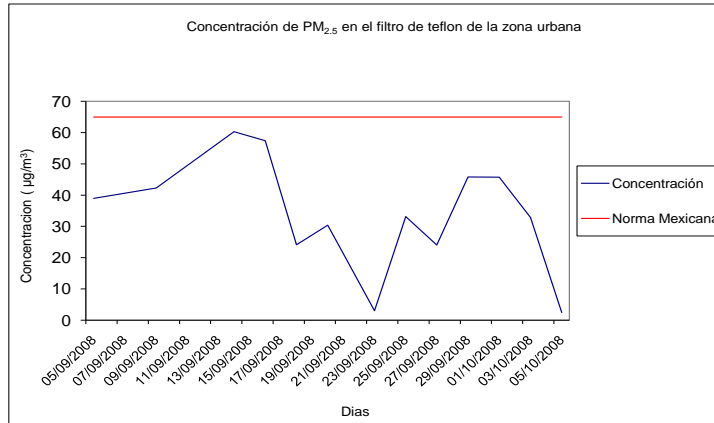


Figura 4.20.- Concentración de PM_{2.5} con el filtro de teflón de la zona urbana

B) Análisis químico

El siguiente paso fue analizar químicamente los filtros:

l) Filtro de teflón:

El filtro de teflón de la zona urbana se tomo el día 14 de septiembre y tuvo un peso de .5 mg con una concentración de PM_{2.5} de 60.31 µg/m³. En la **Figura 4.21** se muestra el tamaño de las partículas que contiene el filtro de teflón tomados durante la campaña de otoño, el cual varia de 2.5 µm hasta los 5.2 µm. Este dato anterior muestra que en la atmósfera de Mexicali hay partículas de 2.5 micrómetros, siendo esto de los más peligrosos puede llegar hasta los alvéolos pulmonares dificultando así la respiración.

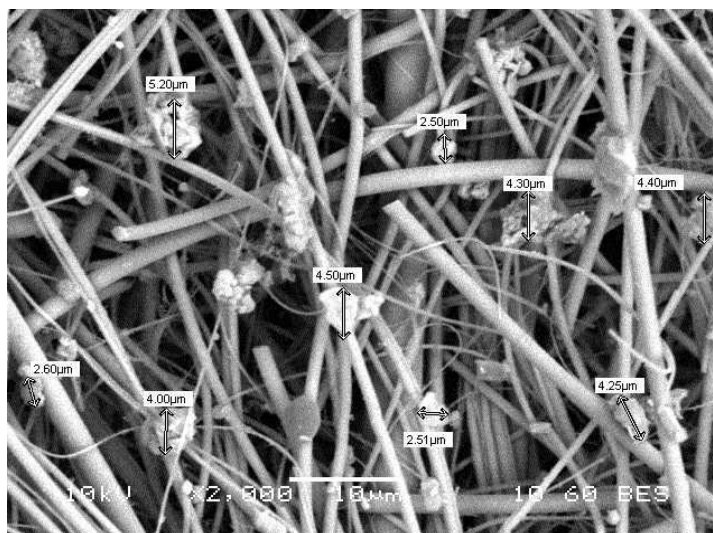


Figura 4.21.- Tamaño de las partículas contenidas en el filtro de Teflón de la zona urbana para el día 14 de septiembre del 2008

En la **Tabla 4.15** se muestran los elementos que contienen las partículas en el filtro de teflón para la zona urbana.

Tabla 4.15.- Elementos encontrados en el filtro de teflón de la zona urbana

Elemento	% Masa	% Atómico
C	10.77	17.55
O	38.37	46.94
F	02.87	02.95
Mg	04.19	03.38
Al	06.22	04.51
Si	30.03	20.93
K	04.12	02.06
Ca	03.43	01.67

En los análisis de las partículas mediante el método EDX destaca el oxígeno con el 38% de peso, el silicio con 30 % y el carbono 10 % (**Tabla 4.15**), la cual tiene mucha similitud con el filtro de teflón tomado en la zona rural, donde se observa una disminución de fierro y aluminio, además se nota la aparición de calcio, que no se detecto en el filtro de teflón de la zona rural. Así mismo en la **Figura 4.22** nos muestra nuevamente el espectro de dispersión de energía.

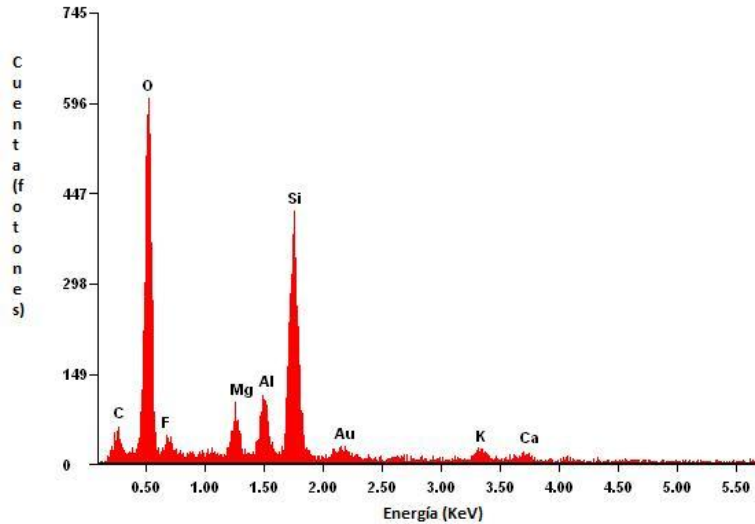


Figura 4.22.- Espectro de dispersión de energía del filtro de teflón de la zona urbana

II) Filtro de cuarzo:

El filtro de cuarzo de la zona urbana se colectó el día 27 de septiembre y tuvo un peso de 1.865 mg con una concentración de $PM_{2.5}$ de $231.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En **Figura 4.23** se muestra el tamaño de las partículas que contiene el filtro de teflón durante la campaña de verano:

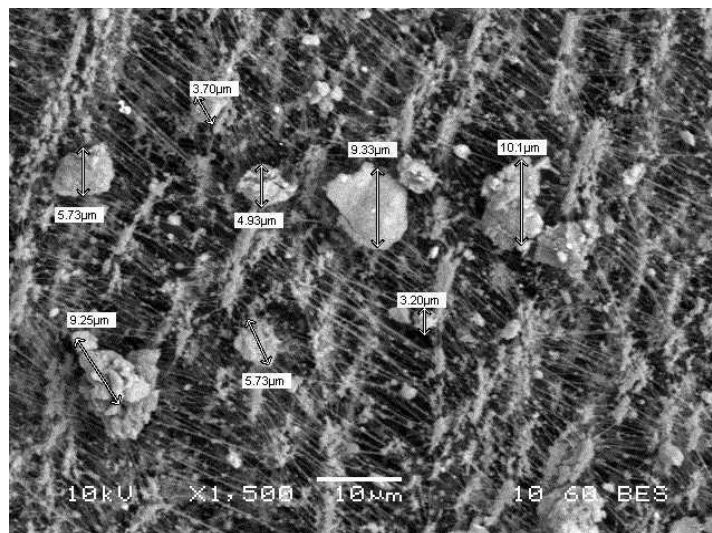


Figura 4.23.- Tamaño de las partículas contenidas en el filtro de teflón de la zona urbana para el día 27 de septiembre del 2008

Los tamaños de las partículas van desde: 3.2 μm hasta los 10.1 μm , contando este filtro con partículas más pequeñas que las obtenidas en la zona rural.

Tabla 4.16.- Elementos encontrados en el filtro de cuarzo para la zona urbana

Elemento	% Masa	% Atómico
C	42.21	55.84
O	18.19	18.06
F	14.53	12.15
Na	01.10	00.76
Mg	01.15	00.75
Al	07.11	04.19
Si	11.85	06.71
K	01.24	00.51
Ca	02.62	01.04

Los análisis mediante el método EDX muestran que a diferencia del anterior filtro de cuarzo colocado en la zona urbana, este contiene carbón con un 42.2 % del peso total de la partícula analizada, la concentración de oxígeno bajaron a 18 %, y el silicio 12 %, en los otros elementos tuvieron similares cantidades (**Tabla 4.16**), en la siguiente imagen nos muestra el espectro de dispersión de energía en KeV (**Figura 4.24**).

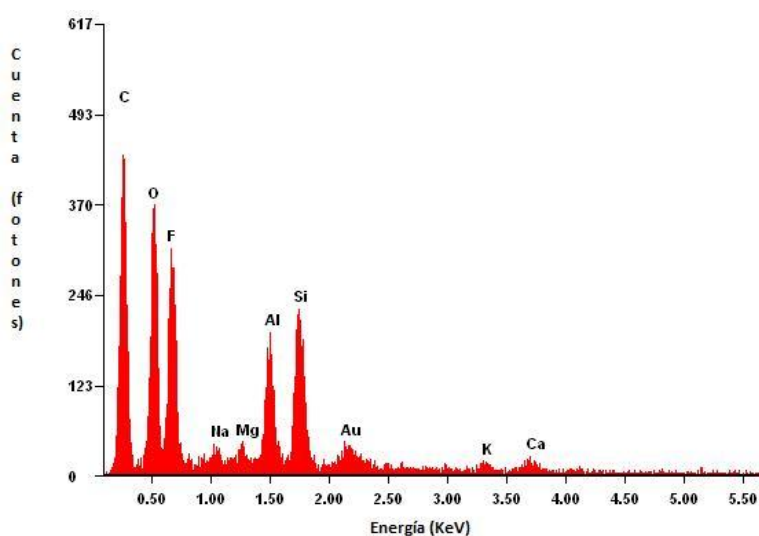


Figura 4.24.- Espectro de dispersión de energía del filtro de cuarzo para la zona urbana

C) Análisis Meteorológico

Para la zona urbana se usaron las mismas comparaciones que en la zona rural, se usaron la temperatura del aire (T_a), la velocidad del viento (V_v) y la humedad relativa (H_r), que se cuantificaron durante el transcurso de la investigación. Para esto se compararon directamente una variable atmosférica contra la concentración de $PM_{2.5}$ para buscar una causa de la disminución o aumento de estas partículas. Estos datos fueron tomados de la estación meteorológica de la UABC.

I) Filtro de cuarzo

En la **Figura 4.25** se muestra la relación de la concentración de las $PM_{2.5}$ y temperatura del aire, donde se ve la temperatura no provoca disminución ni aumento en la contaminación que está en el valle. Mientras que en la **Figura 4.26** se muestra la relación entre la concentración de $PM_{2.5}$ y velocidad del viento, donde se ve que la velocidad solo modifica la concentración de material particulado en algunos días, mientras en otros parece imperceptible. Por último en la **Figura 4.27** no se observa una relación definida entre la concentración de $PM_{2.5}$ y la Humedad relativa.

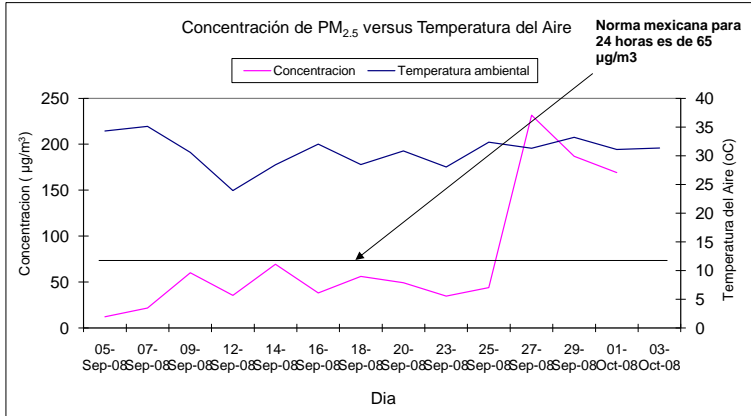


Figura 4.25.- Concentración de PM_{2.5} contra la temperatura del aire para el filtro de cuarzo para la zona urbana

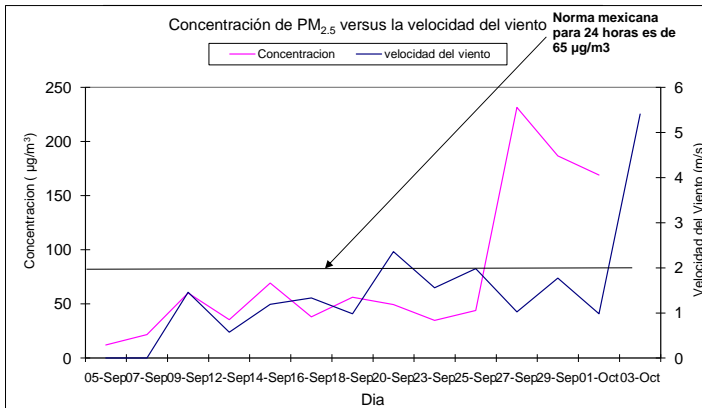


Figura 4.26.- Concentración de PM_{2.5} contra la velocidad del viento para el filtro de cuarzo para la zona urbana

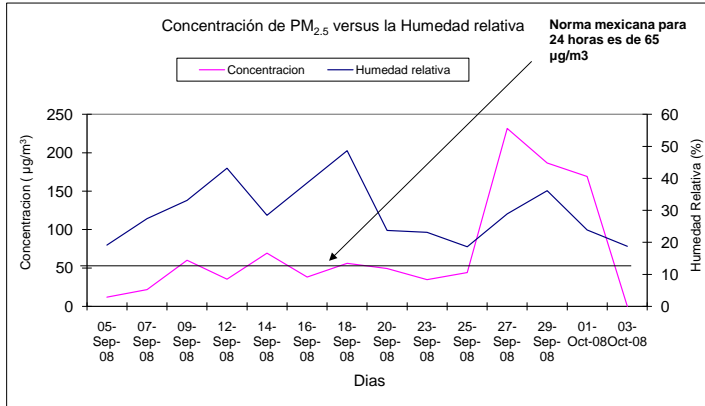


Figura 4.27.- Concentración de PM_{2.5} contra la humedad relativa para el filtro de cuarzo para la zona urbana

II) Filtro de teflón

Se dan las comparaciones entre la concentración de PM_{2.5} y las variables atmosféricas, en la **Figura 4.28** se muestra que la temperatura del aire no provoca que la concentración de PM_{2.5} aumente ni disminuya, para la **Figura 4.29** la velocidad del viento parece influir de manera muy fuerte en los niveles de PM_{2.5} en la región, tal vez debido al arrastre de material particulado a la región. Por último en la **Figura 4.30** se observa como en algunos días la humedad relativa provoca que la concentración de PM_{2.5} disminuya en los primeros días y en los últimos días de muestreo.

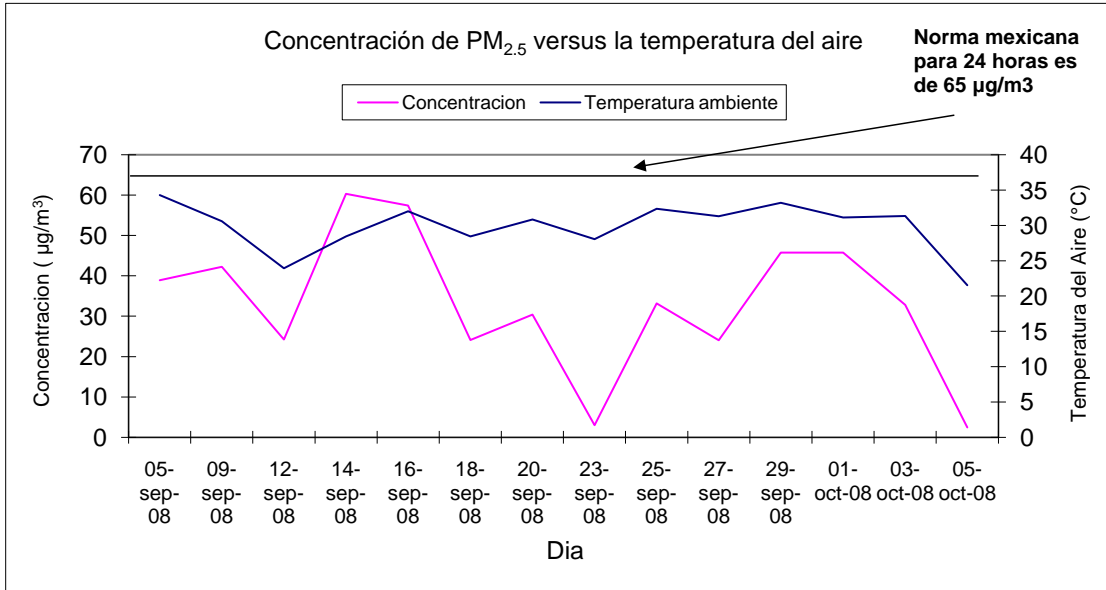


Figura 4.28.- Concentración de PM_{2.5} contra la temperatura del aire para el filtro de teflón para la zona urbana

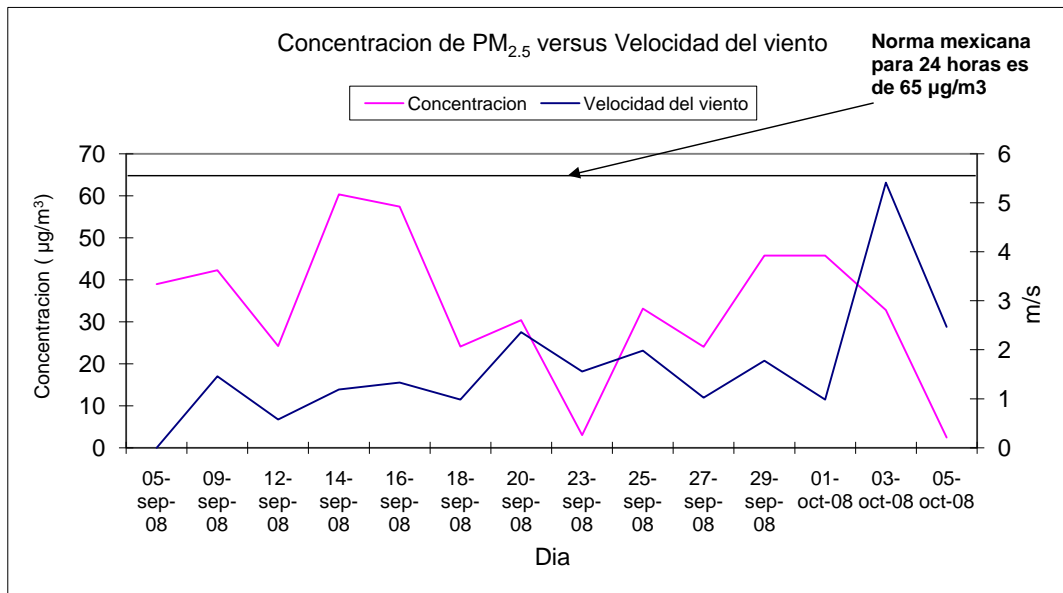


Figura 4.29.- Concentración de PM_{2.5} contra la velocidad del viento para el filtro de teflón para la zona urbana

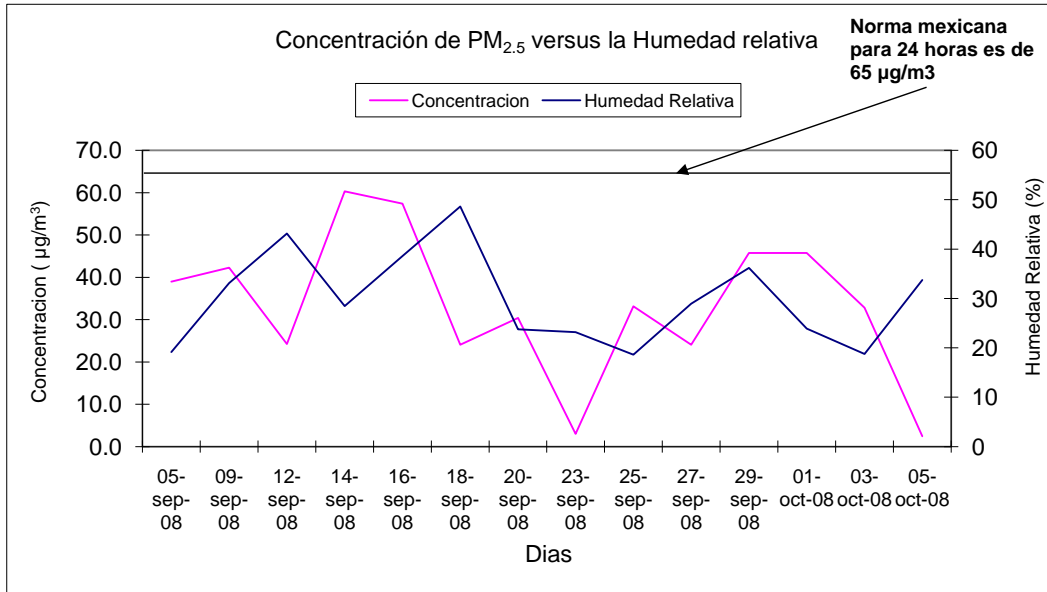


Figura 4.30.- Concentración de PM_{2.5} contra la humedad relativa para el filtro de teflón para la zona urbana

Rosa de los vientos

En lo que se refiere a la zona urbana, en septiembre el viento provenía de la dirección Este y Sur siendo esto un gran abanico de posibilidades de obtener arrastre de partículas de todo el sur del valle, como pueden ser campos de cultivos, arenales y partículas antropogénicas, etc., y contaminación procedente del corredor industrial. (**Figura 4.31**). La diferencia entre la dirección del viento medida en la zona urbana y la zona rural se puede deber a la rugosidad de la ciudad, que provoca que el viento modifique su dirección en el trayecto de un punto a otro. La velocidad máxima del viento fue de 2.9 m/s, y su velocidad promedio fue de 1.1 m/s, notándose una disminución de la velocidad comparándola con la zona rural.

En octubre la dirección del viento en la zona urbana provino predominantemente del este, este-sureste y este – noreste con una velocidad máxima de 3.1 m/s y una velocidad promedio de 1.33 m/s, para la rosa de los vientos del mes de octubre solo se utilizaron los datos de los primeros diez días pudiendo no ser

representativa del mes de estudio, la rosa de los vientos nos dice que la contaminación podría venir de la zona desértica del este de Mexicali, de la zona industrial al este de la ciudad y de los campos de cultivos de valle imperial. (Figura 4.32).

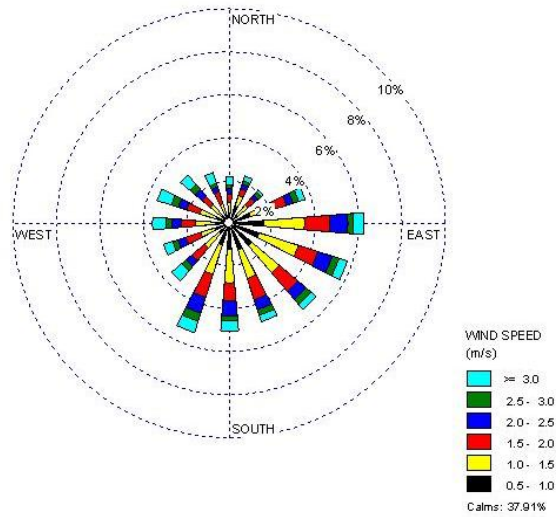


Figura 4.31.- Rosa de los vientos del mes de septiembre del 2008 para la zona urbana

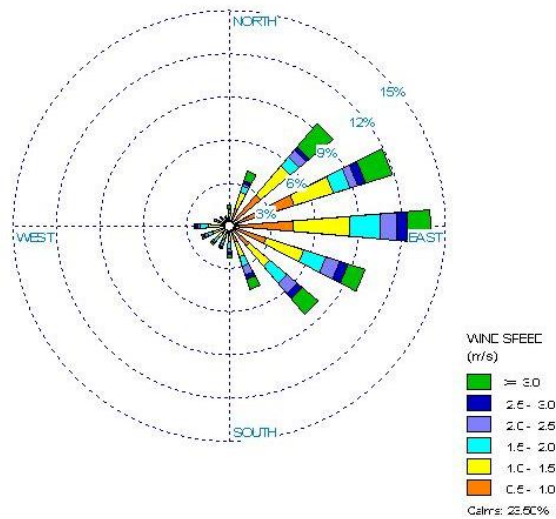


Figura 4.32.- Rosa de los vientos del mes de octubre del 2008 para la zona urbana

D) Análisis Estadístico

Para definir las variables atmosféricas que pudiesen haber sido las que más actuaron para que aumentase la concentración de $PM_{2.5}$ se inició el análisis estadístico de la región. Se tomaron cuatro variables atmosféricas que son: temperatura ambiental (Ta), humedad relativa (Hr), presión ambiental (Pa) y velocidad del viento (Vv), cada una de estas fue fundamental en alguna de las dos zonas donde se hizo el estudio.

Así mismo una variable fue considerada como negativa para el aumento de la concentración, como el caso de temperatura ambiental o una variable positiva para el aumento de concentración como lo es la humedad relativa.

Definir una variable como negativa o positiva tiene que ver como esta determina el aumento o decrecimiento de concentración en un lugar en especial. Para ello se asume una partícula constituida principalmente de material mineral y/o aerosol marino que se haya resuspendido en algún lugar del desierto de Baja California y que esta haya llegado a el valle de Mexicali, propiciando que se coagulara con alguna otra partícula hecha de compuestos de carbono, haciéndose una partícula más grande y por ende con una capacidad de depositación mayor que una más pequeña. En ese tenor esta partícula pudo haberse coagulado con compuestos de azufre provenientes de alguna termoeléctrica, dándonos como resultado una partícula más nociva para la salud de lo que era al principio.

Esta partícula tiene como factor negativo o positivo a la velocidad del viento y su dirección, ya que el viento según la velocidad que este tenga puede resuspender ya sea partículas grandes cuando la velocidad del viento sea poca o partículas pequeñas cuando el viento sea fuerte, también el viento determina que tan lejos esta partícula se depositará según su tamaño. De ahí que una partícula grande se asienta en el suelo en minutos u horas recorriendo poca distancia, mientras que una partícula pequeña se depositará en 4 o 5 días recorriendo distancias grandes.

El viento es positivo para el aumento de la concentración de $PM_{2.5}$ ya que resuspende las partículas, transportándolas a la atmosfera pero al mismo tiempo puede ser negativa ya que la acción del viento puede limpiar el ambiente de partículas suspendidas.

También se debe tomar en cuenta la dirección del viento ya que determina por cuánto tiempo esta partícula estará en un lugar determinado y se puede calcular que tiempo permanecerá suspendido en la atmósfera.

La convección atmosférica, consistente en que el aire inferior, al calentarse por el contacto directo con la superficie y por la radiación procedente de ella, se dilata, aligera y sube, al tiempo que las porciones frías (superiores) descienden, en un proceso continuo de mezcla vertical, esto provoca que el material particulado sea atrapado en la capa baja de la atmosfera.

Cuando la temperatura ambiental sube la humedad relativa no puede afectar tanto a la partícula, en cambio cuando la temperatura ambiental baja, la humedad relativa afecta a la partícula, haciéndola más pesada. Esto podría clasificar a una temperatura ambiental alta como negativa para la concentración de $PM_{2.5}$, esto es, cuando hay una temperatura ambiental alta, tiende a deshidratar la partícula, con esto la partícula es más liviana y pueden viajar más distancias. En cambio cuando la temperatura ambiental es baja, no hay acción que deshidrate esta partícula y por ende es más pesada, haciendo que esta partícula se deposite. Es decir la temperatura ambiental determina si la humedad relativa es positiva o negativa para el aumento de la concentración de $PM_{2.5}$. En cambio la presión ambiental o gravedad atmosférica se puede tomar siempre como negativa ya que provoca que la particular se deposite en los suelos del valle o ciudad de Mexicali.

I) Filtro de cuarzo

Para el análisis estadístico se hizo una correlación múltiple con los cuatro factores atmosféricos, llamados variables independientes a un nivel de confianza de 95 %, se quitaron aquella o aquellas variables que no tuvieran una determinación (R^2) alta que pueda influir en la concentración de $PM_{2.5}$, llamada variable dependiente, de ahí que para el caso de la zona urbana con el filtro de cuarzo las tres variables independientes fueron: presión atmosférica (Pa), temperatura ambiental (Ta) y velocidad del viento (Vv) con una determinación de 0.2732. Las R^2 de las dos variables independientes más altas fueron: la presión atmosférica con 0.1452 (**Figura 4.33a**), siendo la que tiene la determinación más alta y la temperatura ambiental con 0.0557 (**Figura 4.33b**), en cambio la más baja fue la velocidad del viento con 0.0335 para velocidad del viento.

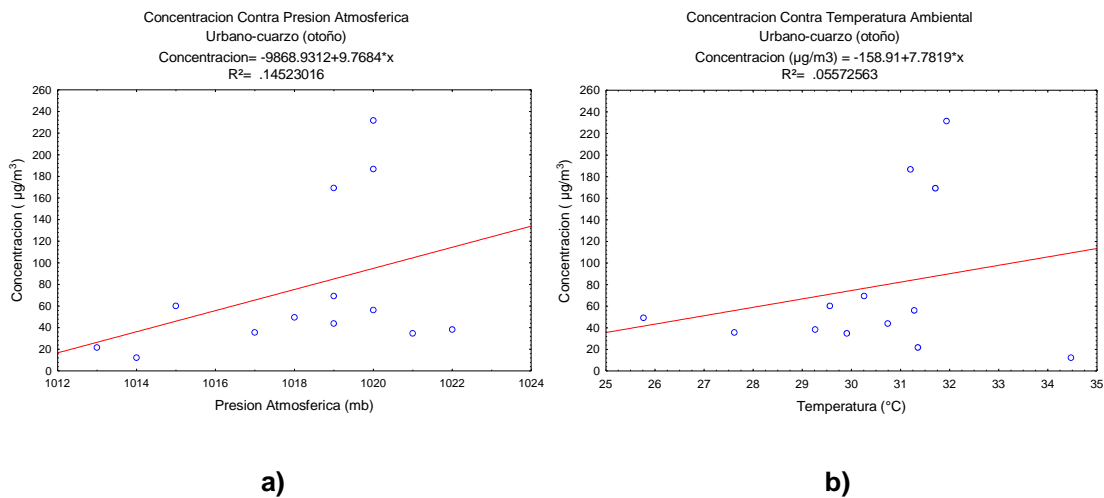


Figura 4.33.- a) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra presión atmosférica para la zona urbana; b) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra temperatura del aire para la zona urbana

Estos resultados dan a conocer que ninguna de las tres variables independientes fue significativa para influir en la concentración de $PM_{2.5}$.

II) Filtro de teflón

Con el filtro de teflón, se tomaron las mismas variables que con el filtro de cuarzo, para esto se obtuvo una determinación de 0.1726 de las tres variables juntas, con un nivel de confianza de 95 %, Las R^2 de las dos variables independientes más altas fueron: la presión atmosférica con 0.0364 (**Figura 4.34a**) y la temperatura ambiental con 0.1426 (**Figura 4.34b**) siendo la que tiene la determinación más alta y mientras que la velocidad del viento tuvo la mas baja con 0.0223.

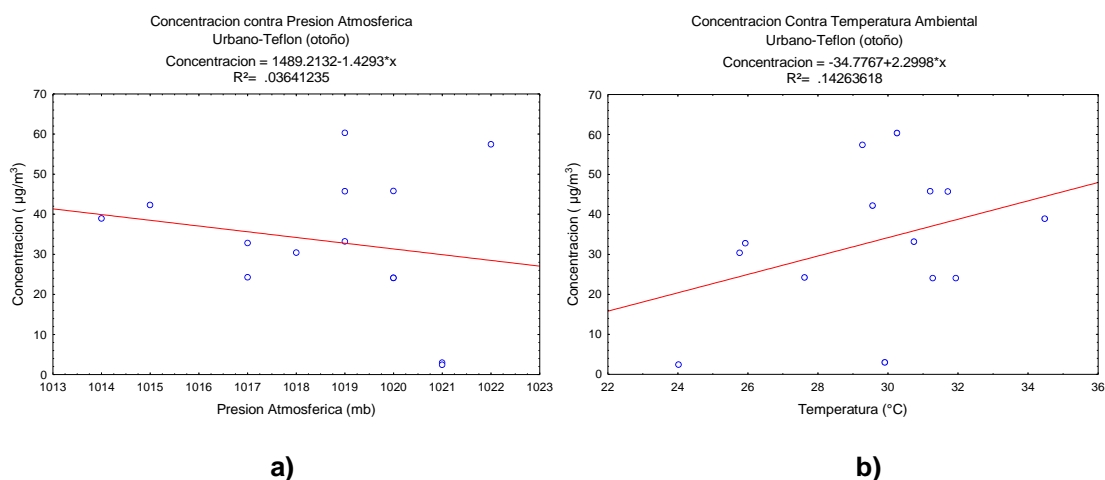


Figura 4.34.- a) Determinación de la concentración de PM_{2.5} contra presión atmosférica para la zona urbana; b) Determinación de la concentración de PM_{2.5} contra temperatura del aire para la zona urbana

Ninguna variable fue lo suficientemente alta como para que pudiera influir en la disminución o aumento de la concentración de PM_{2.5}, aun así para la zona urbana tanto la presión ambiental como la temperatura ambiental fueron las variables que más influyeron para modificar la concentración de PM_{2.5}.

4.2- Resultados de la campaña de invierno.

Preparación del filtro

En esta nueva temporada, los filtros fueron ambientalizados, para evitar el efecto de la humedad relativa. El muestreo se inicio a las 12 pm del día 1 de enero. Las temperaturas durante la campaña de invierno fueron muy estables durante el transcurso del mes de enero, se dieron rangos de temperatura en el valle de 10 a 20 °C, con rangos de humedad relativa de 36 a 70 %, mientras en la ciudad tuvo un rango de 11 a 20 °C, con rangos de humedad relativa de 18 a 60 %. En el trascurso del viaje al Valle de Mexicali, se observaron varias quemadas de residuos agrícolas, quema de basura en los patios de varias viviendas, asimismo se vieron en operación 6 sitios diferentes de hornos de cocimiento de ladrillos, además de la remoción de tierra de los campos de cultivo haciendo que se resuspendiera gran cantidad de polvo a la atmósfera contribuyendo así a un aumento en el material particulado en el valle (**Figura 4.35**).



Figura 4.35.- Quema de residuos agrícolas

Las condiciones atmosféricas típicas de invierno se caracterizan por la reducción del espesor de la capa de mezcla y la presencia frecuente de inversiones térmicas en superficie, lo cual resulta en la menor capacidad dispersiva de la atmósfera. Ello implica en las zonas urbanas e industriales la acumulación y concentración de los contaminantes atmosféricos, con lo que los niveles de partículas alcanzan un máximo invernal. Asimismo, la mayor estratificación y estabilidad atmosférica impide el transporte a escala regional de contaminantes, y por ello las estaciones rurales registran mínimos invernales de partículas (Viana R., 2003)

4.2.1.- Resultados de la zona rural

A) Análisis gravimétrico

En la **Tabla 4.17** se dan los resultados para los filtros de cuarzo y el análisis gravimétrico:

Tabla 4.17.- Análisis gravimétrico para los filtros de cuarzo de la zona rural

No de Filtro:	Peso Inicial:	Peso Final:	Diferencia de Peso
Rur - 01 - Cua	147.121	152.521	5.400000
Rur - 02 - Cua	147.226	153.573	6.347000
Rur - 03 - Cua	145.602	146.739	1.137000
Rur - 04 - Cua	140.284	142.074	1.790000
Rur - 05 - Cua	144.588	146.172	1.584000
Rur - 06 - Cua	141.355	148.186	6.831000
Rur - 07 - Cua	145.24	149.599	4.359000
Rur - 08 - Cua	145.987	152.285	6.298000
Rur - 09 - Cua	143.376	146.355	2.979000
Rur - 10 - Cua	147.81	150.63	2.820000
Rur - 11 - Cua	146.432	146.727	0.295000
Rur - 12 - Cua	144.181	144.906	0.725000
Rur - 13 - Cua	147.229	147.424	0.195000
Rur - 14 - Cua	146.782	sin valor	sin valor
Rur - 15 - Cua	148.698	148.796	0.098000
Rur - 16 - Cua	146.067	148.073	2.006000

El filtro 14 se dañó debido a la fuerza de succión de la máquina que perforó el filtro dejándolo inútil.

En la **Tabla 4.18** se dan los resultados para los filtros de teflón y el análisis gravimétrico:

Tabla 4.18.- Análisis gravimétrico para los filtros de teflón de la zona rural

No de Filtro:	Peso Inicial:	Peso Final:	Diferencia de Peso:
Rur - 01 - Tef	140.74	141.008	0.268000
Rur - 02 - Tef	140.135	140.34	0.205000
Rur - 03 - Tef	140.621	140.65	0.029000
Rur - 04 - Tef	140.401	140.899	0.498000
Rur - 05 - Tef	139.918	140.542	0.624000
Rur - 06 - Tef	140.563	141.116	0.553000
Rur - 07 - Tef	139.571	139.91	0.339000
Rur - 08 - Tef	140.602	141.201	0.599000
Rur - 09 - Tef	140.13	141.268	1.138000
Rur - 10 - Tef	141.313	142.072	0.759000
Rur - 11 - Tef	140.059	140.581	0.522000
Rur - 12 - Tef	140.398	140.555	0.157000
Rur - 13 - Tef	139.985	140.184	0.199000
Rur - 14 - Tef	139.959	140.24	0.281000
Rur - 15 - Tef	140.057	140.442	0.385000
Rur - 16 - Tef	139.851	140.148	0.297000

Al tener las diferencias de peso se procedió a sacar el flujo final del muestreador para eso se utilizaron las siguientes constantes:

Para el muestreador con filtro de cuarzo:

m_{vol} : 1.0219; b_{vol} : -0.2059 y Q_{ind} : 5 L/min

Para el muestreador con filtro de teflón:

m_{vol} : 0.9652; b_{vol} : 0.5934 y Q_{ind} : 5 L/min

Otros datos usados fueron la presión atmosférica y la temperatura ambiental.

En las **Tablas 4.19 y 4.20** se muestran los flujos finales en los filtros de cuarzo y teflón.

Tabla 4.19.- Qfin (flujo patrón) del muestreador que contenía el filtro de cuarzo en la zona rural

Pact	Pest	Tact	Test	(MvolQind + Bvol)	Pres atm 1	Tem Atm 1	PA * TA	(PA * TA)1/2	Qact
1010,7	1013	12,5	24,85	4,9036	1,0023	0,5030	0,5042	0,7100	5,6136
1016,2	1013	12	24,85	4,9036	0,9969	0,4829	0,4814	0,6938	5,5974
1019,9	1013	10,3	24,85	4,9036	0,9932	0,4145	0,4117	0,6416	5,5452
1015,3	1013	12,5	24,85	4,9036	0,9977	0,5030	0,5019	0,7084	5,6120
1028,9	1013	13,6	24,85	4,9036	0,9845	0,5473	0,5388	0,7340	5,6376
1022,1	1013	16,7	24,85	4,9036	0,9911	0,6720	0,6660	0,8161	5,7197
1018,6	1013	15,4	24,85	4,9036	0,9945	0,6197	0,6163	0,7851	5,6887
1021,7	1013	19,9	24,85	4,9036	0,9915	0,8008	0,7940	0,8911	5,7947
1020,3	1013	17,2	24,85	4,9036	0,9928	0,6922	0,6872	0,8290	5,7326
1017,3	1013	18,2	24,85	4,9036	0,9958	0,7324	0,7293	0,8540	5,7576
1013,7	1013	18,9	24,85	4,9036	0,9993	0,7606	0,7600	0,8718	5,7754
1017,3	1013	16,7	24,85	4,9036	0,9958	0,6720	0,6692	0,8180	5,7216
1013,4	1013	13	24,85	4,9036	0,9996	0,5231	0,5229	0,7231	5,6267
1023,7	1013	11,5	24,85	4,9036	0,9895	0,4628	0,4579	0,6767	5,5803
1021,1	1013	15,6	24,85	4,9036	0,9921	0,6278	0,6228	0,7892	5,6928
1017,5	1013	15,5	24,85	4,9036	0,9956	0,6237	0,6210	0,7880	5,6916

Tabla 4.20.- Qfin (flujo patrón) del muestreador que contenía el filtro de teflón en la zona rural

Pact	Pest	Tact	Test	(MvolQind + Bvol)	Pres atm 1	Tem Atm 1	PA * TA	(PA * TA)1/2	Qact
1010,7	1013	12,5	24,85	5,4194	1,0023	0,5030	0,5042	0,7100	6,1294
1016,2	1013	12	24,85	5,4194	0,9969	0,4829	0,4814	0,6938	6,1132
1019,9	1013	10,3	24,85	5,4194	0,9932	0,4145	0,4117	0,6416	6,0610
1015,3	1013	12,5	24,85	5,4194	0,9977	0,5030	0,5019	0,7084	6,1278
1028,9	1013	13,6	24,85	5,4194	0,9845	0,5473	0,5388	0,7340	6,1534
1022,1	1013	16,7	24,85	5,4194	0,9911	0,6720	0,6660	0,8161	6,2355
1018,6	1013	15,4	24,85	5,4194	0,9945	0,6197	0,6163	0,7851	6,2045
1021,7	1013	19,9	24,85	5,4194	0,9915	0,8008	0,7940	0,8911	6,3105
1020,3	1013	17,2	24,85	5,4194	0,9928	0,6922	0,6872	0,8290	6,2484
1017,3	1013	18,2	24,85	5,4194	0,9958	0,7324	0,7293	0,8540	6,2734
1013,7	1013	18,9	24,85	5,4194	0,9993	0,7606	0,7600	0,8718	6,2912
1017,3	1013	16,7	24,85	5,4194	0,9958	0,6720	0,6692	0,8180	6,2374
1013,4	1013	13	24,85	5,4194	0,9996	0,5231	0,5229	0,7231	6,1425
1023,7	1013	11,5	24,85	5,4194	0,9895	0,4628	0,4579	0,6767	6,0961
1021,1	1013	15,6	24,85	5,4194	0,9921	0,6278	0,6228	0,7892	6,2086
1017,5	1013	15,5	24,85	5,4194	0,9956	0,6237	0,6210	0,7880	6,2074

Una vez que se obtuvo el flujo final se procedió a sacar la concentración de partículas menores a 2.5 micrómetros, para lo cual se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$\text{Flujo Patrón: } F_{\text{ptn}} = (Q_{\text{ini}} + Q_{\text{fin}})/2 \quad (1)$$

El flujo patrón (1) es la cantidad de aire promedio que ha entrado hacia la bomba de succión del muestreador en el transcurso de 24 horas.

$$CtPM_{2.5}: ((W2 - W1)10^6)/(F_{ptn}) \quad (2)$$

La concentración de $PM_{2.5}$ (2) es la división de la diferencia de peso entre el flujo final, todo esto multiplicado por 10^6 para poder expresarlo en micrómetros sobre metros cúbicos.

En las **Tablas 4.21 y 4.22** se dan las concentraciones de $PM_{2.5}$ en los filtros de cuarzo y teflón, así como el proceso mediante el cual se obtuvieron:

Tabla 4.21.- Concentraciones de las $PM_{2.5}$ en el filtro de cuarzo de la zona rural

Fecha	Flujo Ini	Q act	F pat	Dif de Peso	Peso Pat	Flujo pat2	mg/m3
01-ene-09	5	5.6136	5.3068	5.400000	5400000	7641.8238	706.6376
03-ene-09	5	5.5974	5.2987	6.347000	6347000	7630.1375	831.8330
05-ene-09	5	5.5452	5.2726	1.137000	1137000	7592.5621	149.7518
07-ene-09	5	5.6120	5.3060	1.790000	1790000	7640.6644	234.2728
09-ene-09	5	5.6376	5.3188	1.584000	1584000	7659.1065	206.8126
11-ene-09	5	5.7197	5.3599	6.831000	6831000	7718.1971	885.0512
13-ene-09	5	5.6887	5.3443	4.359000	4359000	7695.8316	566.4105
15-ene-09	5	5.7947	5.3973	6.298000	6298000	7772.1543	810.3287
17-ene-09	5	5.7326	5.3663	2.979000	2979000	7727.4545	385.5086
19-ene-09	5	5.7576	5.3788	2.820000	2820000	7745.4647	364.0840
21-ene-09	5	5.7754	5.3877	0.295000	295000	7758.2892	38.0238
23-ene-09	5	5.7216	5.3608	0.725000	725000	7719.5817	93.9170
25-ene-09	5	5.6267	5.3134	0.195000	195000	7651.2532	25.4860
27-ene-09	5	5.5803	5.2902	#¡VALOR!	#¡VALOR!	7617.8249	Dañada
29-ene-09	5	5.6928	5.3464	0.098000	98000	7698.7932	12.7293
31-ene-09	5	5.6916	5.3458	2.006000	2006000	7697.9702	260.5882

Se notó un aumento importante en los filtros de cuarzo donde la mayoría de los días rebasó la norma mexicana. Con los filtros de cuarzo hubo 12 violaciones a la norma, la primera se tomo el 1 de enero y la ultima el 19 de enero, el rango fue de 12.72 a 885.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabla 4.22.- Concentraciones de las PM_{2.5} en el filtro de teflón de la zona rural

Flujo Ini	Q act	F pat	Dif de Peso	Peso Pat	Flujo pat2	mg/m3
5	6.1294	5.5647	0.268000	268000	8013.1998	33.4448
5	6.1132	5.5566	0.205000	205000	8001.5135	25.6202
5	6.0610	5.5305	0.029000	29000	7963.9381	3.6414
5	6.1278	5.5639	0.498000	498000	8012.0404	62.1565
5	6.1534	5.5767	0.624000	624000	8030.4825	77.7039
5	6.2355	5.6178	0.553000	553000	8089.5731	68.3596
5	6.2045	5.6022	0.339000	339000	8067.2076	42.0220
5	6.3105	5.6552	0.599000	599000	8143.5303	73.5553
5	6.2484	5.6242	1.138000	1138000	8098.8305	140.5141
5	6.2734	5.6367	0.759000	759000	8116.8407	93.5093
5	6.2912	5.6456	0.522000	522000	8129.6652	64.2093
5	6.2374	5.6187	0.157000	157000	8090.9577	19.4044
5	6.1425	5.5713	0.199000	199000	8022.6292	24.8048
5	6.0961	5.5481	0.281000	281000	7989.2009	35.1725
5	6.2086	5.6043	0.385000	385000	8070.1692	47.7066
5	6.2074	5.6037	0.297000	297000	8069.3462	36.8060

Mientras con el filtro de teflón (**Tabla 4.22**) solo se tuvieron 5 violaciones, de la siguiente manera: el 9 de enero con 77.7 µg/m³, el 11 de enero con 68.35 µg/m³, el 15 de enero con 73.55 µg/m³, el 17 de enero con 140. 51 µg/m³ y por último el 19 de enero con 93.5 µg/m³.

En la **Figura 4.36** se observa que la mayoría de los días la concentración de PM_{2.5} estuvo por arriba de la norma mexicana que permite solo 65 µg/m³

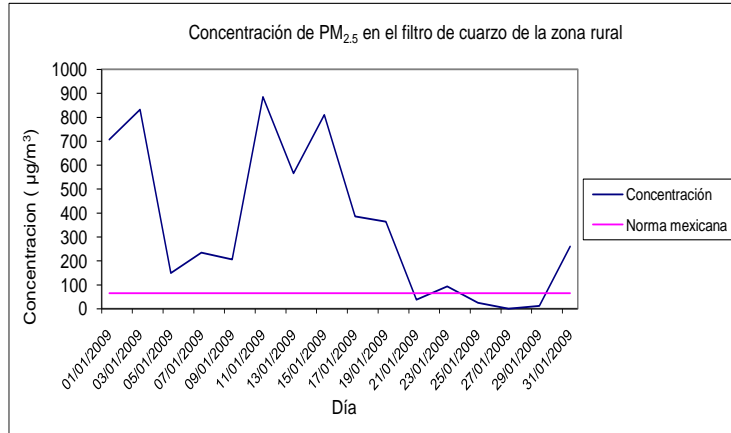


Figura 4.36.- Concentración de PM_{2.5} en el filtro de cuarzo en la zona rural

En la **Figura 4.37** se muestra un aumento de concentración de PM_{2.5} del 9 al 19 de enero, tal vez debido al inicio de la quema de residuos agrícolas y el polvo de los caminos no pavimentados del valle.

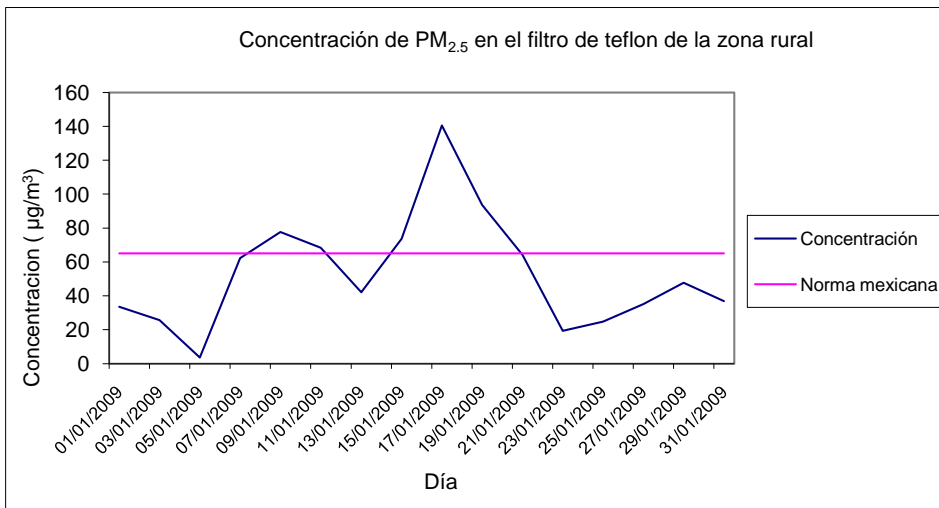


Figura 4.37.- Concentración de PM_{2.5} en filtro de teflón en la zona rural

B) Análisis químico

Después del análisis gravimétrico los filtros se mantuvieron almacenados en cajas petri en un refrigerador donde se mantenían a la misma temperatura. El siguiente paso fue analizar químicamente los filtros con las muestras más representativas de la zona rural usándose las muestras con mayor peso, estos filtros fueron analizados por el método EDX, los cuales dieron imágenes y resultados de lo que contiene los filtros.

I) Filtro de teflón:

El filtro de teflón de la zona rural se tomó el 17 de Enero y tuvo un peso de 1.138 mg con una concentración de $PM_{2.5}$ de $140.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En la **Figura 4.38** se muestra el tamaño de las partículas que contiene el filtro de teflón tomados durante la campaña de invierno con tamaño que va de los $3.8 \mu\text{m}$ a las $7.9 \mu\text{m}$.

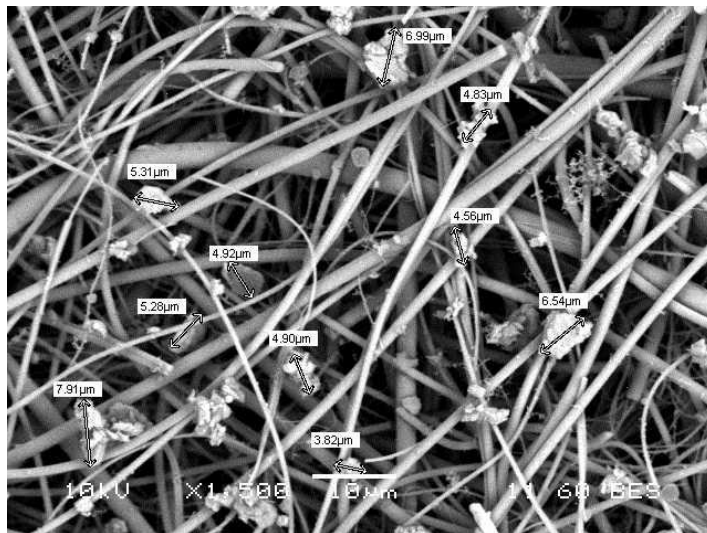


Figura 4.38.- Tamaño de las partículas contenidas en el filtro de teflón en la zona rural del 17 de enero del 2008

En la **Tabla 4.23** se muestra el análisis hecho con el método EDX a una partícula seleccionada del filtro de teflón donde se muestra un nivel similar de oxígeno y

silicio encontrados en otros filtros con 35 % y 29 % respectivamente. Se encontró calcio, además de otros elementos que no aparecían en los filtros de teflón como: el cloro, el sodio, fierro que es el metal más usado en la tierra, se emplea en siderúrgicas, en el acero, en las fundiciones y el Cloro que se presenta principalmente en cloruros, cloritos y cloratos, se presenta en el medio terrestre en forma de Cloruro de sodio (NaCl “sal”), además de usarse en catalizadores, pesticidas y clorofluorocarburos, por lo cual se puede asumir que en invierno se liberan a la atmósfera otros contaminantes que normalmente en verano no ocurre, mientras en la **Figura 4.39**, nos muestra el espectro de dispersión de energía en KeV.

Tabla 4.23.- Elementos encontrados en el filtro de teflón para la zona rural

Elemento	% Masa	% Atómico
C	09.16	15.98
O	34.87	45.67
Fe	07.90	02.96
Na	01.22	01.11
Mg	03.24	02.79
Al	08.22	06.39
Si	29.09	21.70
Cl	01.04	00.62
K	02.64	01.42
Ca	02.63	01.37

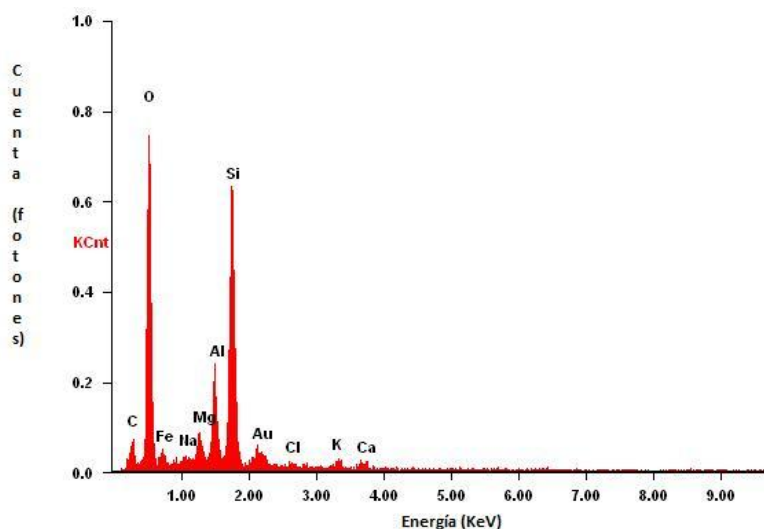


Figura 4.39.- Espectro de dispersión de energía del filtro de teflón para la zona rural

II) Filtro de cuarzo:

El filtro de cuarzo de la zona rural se tomó el 11 de Enero y tuvo un peso de 6.831 mg con una concentración de $PM_{2.5}$ de $885.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En la **Figura 4.40** se muestra el tamaño de las partículas que contiene el filtro de cuarzo tomados durante la campaña de invierno. El tamaño de las partículas van desde los $3.4 \mu\text{m}$ hasta los $9.33 \mu\text{m}$.

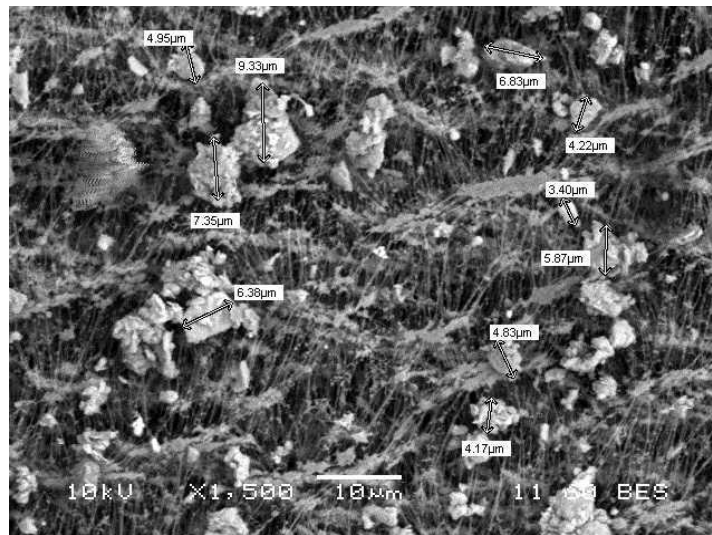


Figura 4.40.- Tamaño de las partículas contenidas en el filtro de cuarzo de la zona rural para el día 11 de enero del 2008

El análisis hecho con el método EDX a una partícula seleccionada del filtro de teflón muestra diferencias con otros filtros. Ya que el carbono la integra en un 23%, el fierro con 23%, el oxígeno con 16%, y el cloro con 11%, muy similar a otros análisis (**Tabla 4.24**), mientras en la **Figura 4.41** nos muestra el espectro de dispersión de energía en KeV.

Tabla 4.24.- Elementos encontrados en el filtro de cuarzo para la zona rural

Elemento	% Masa	% Atómico
C	23.11	35.28
O	16.74	19.18
F	22.84	22.05
Na	10.37	08.27
Mg	01.54	01.16
Al	02.73	01.85
Si	05.76	03.76
Cl	11.79	06.10
K	01.16	00.54
Ca	03.96	01.81

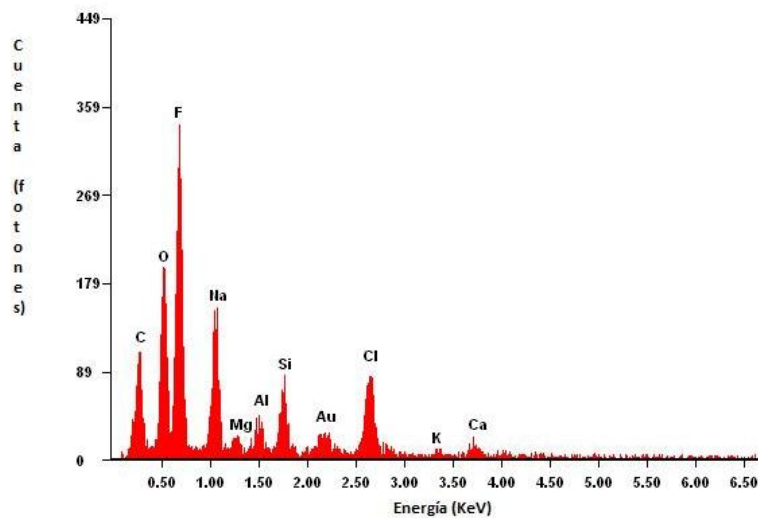


Figura 4.41.- Espectro de dispersión de energía del filtro de cuarzo para la zona rural

C) Análisis Meteorológico

I) Filtro de cuarzo

En la **Figura 4.42** se observa la comparación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra la temperatura del aire, donde parece no influir en el material particulado ni repercutir en su aumento; en la **Figura 4.43** se muestra la comparación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra la velocidad del viento, donde en algunos días se nota como la velocidad del viento provoca disminución y/o dispersión del material particulado en la región, y por último en la **Figura 4.44** donde se muestra que la

humedad relativa no influye en los primeros días del muestreo al material particulado, pero que los últimos días del muestreo se ve que cuando la humedad relativa sube o baja, el material particulado aumenta o disminuye, en algunos días la velocidad del viento y la humedad relativa cooperan para que las $PM_{2.5}$ sean modificadas.

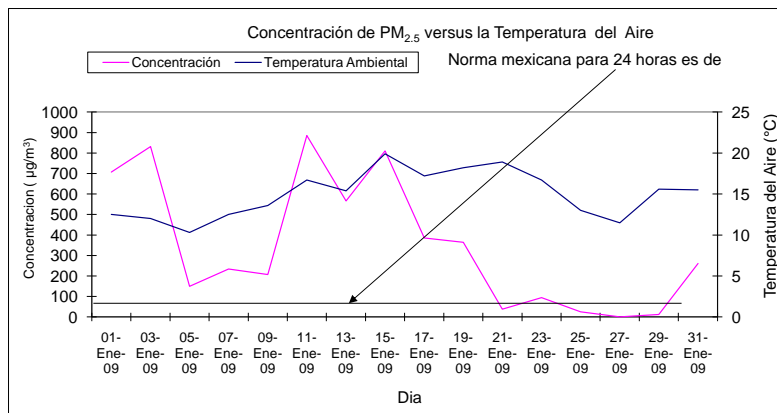


Figura 4.42.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la temperatura del aire en el filtro de cuarzo para la zona rural

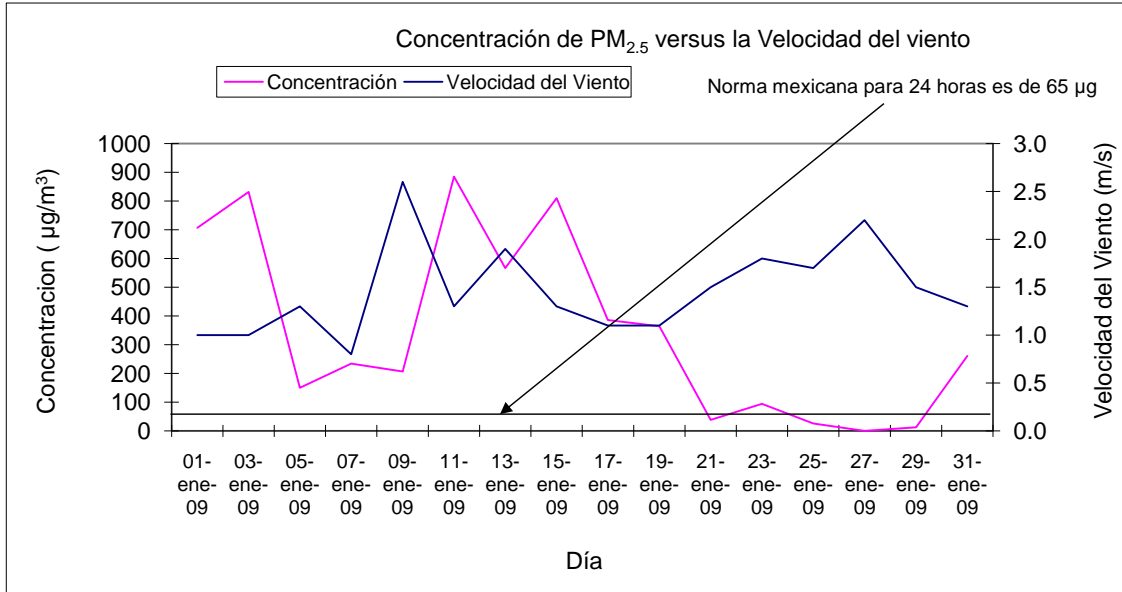


Figura 4.43.- Concentración de PM_{2.5} contra la velocidad del viento para el filtro de cuarzo para la zona rural

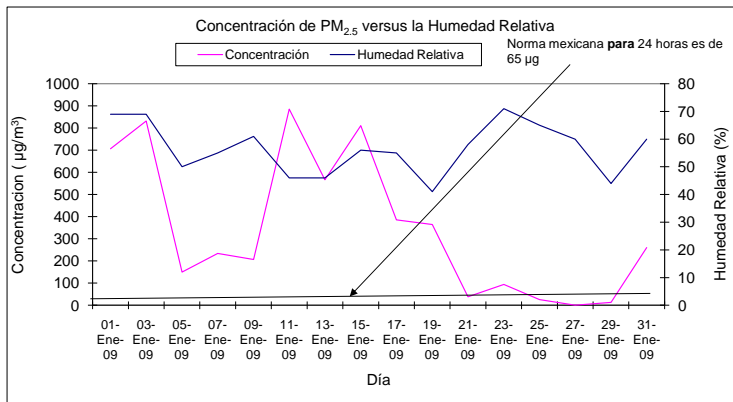


Figura 4.44.- Concentración de PM_{2.5} contra la humedad relativa para el filtro de cuarzo para la zona rural

II) Filtro de teflón

Para la **Figura 4.45** se ve como en algunos días la temperatura del aire influye directamente en la contaminación producida por las $PM_{2.5}$, para la **Figura 4.46**, vemos como la velocidad del aire en algunos momentos dispersa la contaminación del aire, mas en algunos días el viento no puso dispersar el material particulado, posiblemente debido a la excesiva contaminación del ambiente, en la **Figura 4.47** se nota como la Humedad relativa es la variable ambiental que más afecta en las $PM_{2.5}$, ya que es la provoca disminución o aumento del material particulado en la región.

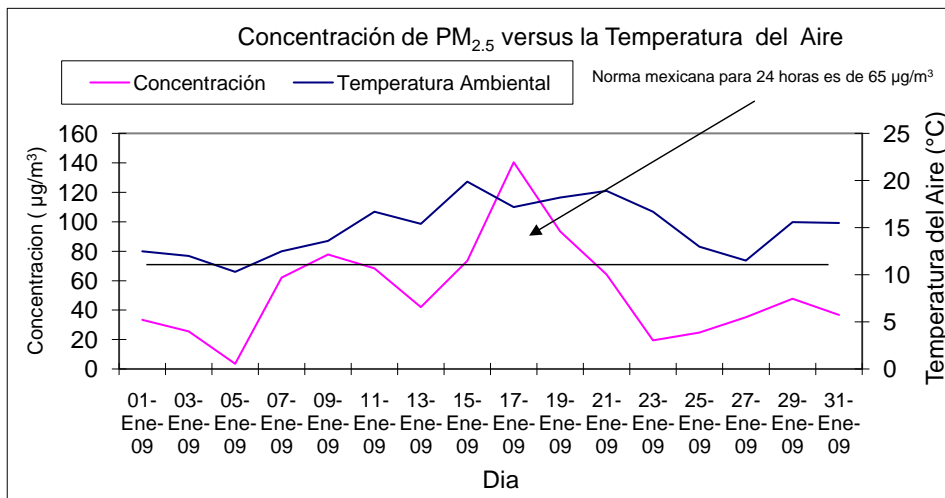


Figura 4.45.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la temperatura del aire para el filtro de teflón para la zona rural

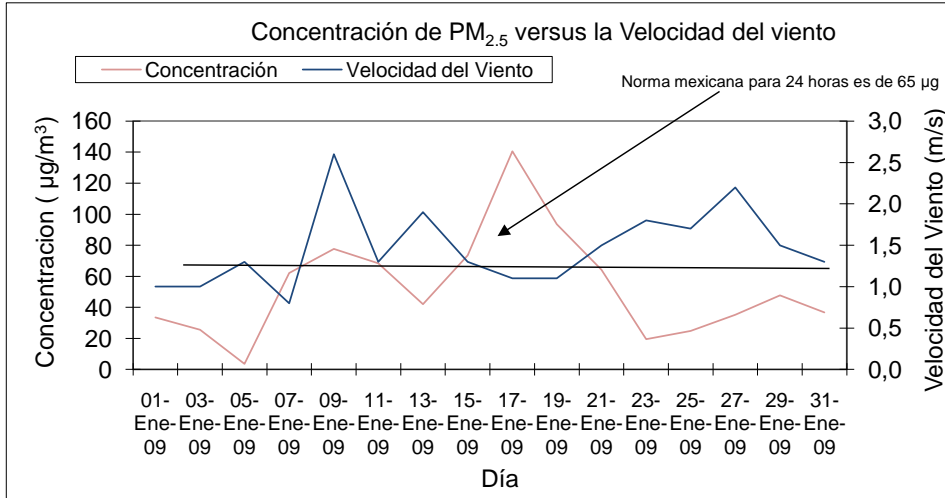


Figura 4.46.- Concentración de PM_{2.5} contra la velocidad del viento para el filtro de teflón para la zona rural

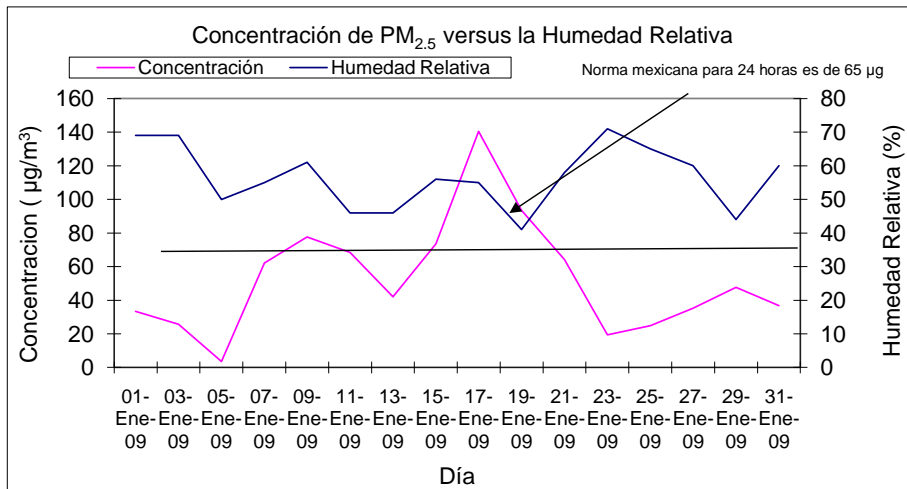


Figura 4.47.- Concentración de PM_{2.5} contra la humedad relativa para el filtro de teflón para la zona rural

Rosa de los vientos

En lo que se refiere a la rosa de los vientos para la zona rural, en enero la dirección del viento provenía del Noroeste y el Oeste - Noroeste, atrayendo principalmente partículas de los campos de cultivos del norte de los EEUU (**Figura 4.48**). La diferencia entre direcciones del viento entre la zona urbana y la zona rural se puede deber a el numero de datos que se tuvo para la investigación y a la diferencia de tiempo que se tenía entre ellos, ya que los datos de la zona urbana eran cada minutos en cambio para la zona rural eran por día. La velocidad máxima del 5 viento para la zona rural fue de 3 m/s y la velocidad promedio fue de 1.5 m/s.

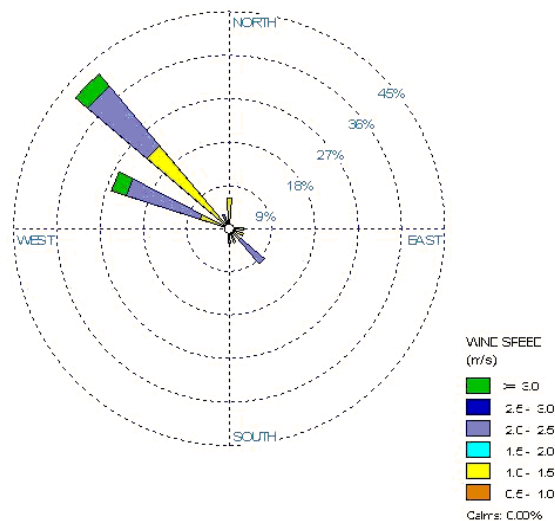


Figura 4.48.- Rosa de los vientos para enero del 2009 para la zona rural de la ciudad de Mexicali

D) Análisis Estadístico

Para la temporada de invierno se tomaron las mismas cuatro variables atmosféricas que la temporada de verano – otoño, como son la presión ambiental, temperatura ambiental, humedad relativa y velocidad del viento; las condiciones atmosféricas fueron diferentes en lo que respecta a la temperatura ambiental, velocidad y dirección del viento, mientras que la humedad relativa fue muy similar a la de la temporada de otoño, la presión ambiental fue más alta en invierno que

en otoño. En pocas palabras las diferencias entre variables atmosféricas entre otoño e invierno pudieron haber sido la razón de un aumento de concentración de $PM_{2.5}$. En primer lugar las partículas provenían de diferentes lugares ya que el viento se origina principalmente del Norte y del Este, estas probablemente se componen de material mineral como de aerosol marino, la velocidad del viento fue ligeramente más alta que en la pasada temporada así que el transporte de las partículas es más efectivo.

Se debe hacer notar que la humedad relativa fue importante en la precipitación de una partícula en el suelo, ya que las temperaturas ambientales eran menores que en otoño; la temperatura ambiental fue baja en todo el mes, no permitiendo la deshidratación de la partícula, lo que provocó que la partícula fuera más pesada y no fuese transportada largas distancias y por ende que se hayan depositado más fácilmente en la ciudad de Mexicali o su valle. La presión ambiental también pudo haber provocado una depositación más rápida en los suelos de Mexicali. También se debe observar que tomando en cuenta la dirección del viento en esta temporada la contaminación va de la ciudad al valle esto es, pudieron haber llegado partículas cargadas de compuestos de carbono, provenientes principalmente de la mala combustión de los autos, los puestos de comida, quema de basura y de llantas, resuspensión de polvo de caminos pavimentados y no pavimentados, etc.

En esta temporada la velocidad del viento pudo haber sido positiva o negativa, positiva porque resuspendió partículas o negativa cuando la velocidad del viento menguó; en cambio en esta temporada la temperatura no determinó si la humedad relativa fuese un factor negativo o positivo, ya que debido a las bajas temperaturas no llegó a provocar bajas de humedad dentro de la partícula, de ahí que la humedad relativa se tomó individualmente, tomándose siempre como negativa para la concentración de $PM_{2.5}$ ya que ésta hacía que se depositasen las partículas en el suelo, mientras la presión ambiental fue tomada siempre como negativa.

II) Filtro de cuarzo

Para el análisis estadístico de la zona rural con el filtro de cuarzo se tomaron tres variables independientes como: presión ambiental, humedad relativa y velocidad del viento con una determinación de 0.2384 con un nivel de confianza de 96 %, las R^2 de las tres diferentes variables fueron: la presión ambiental con 0.0023 (**Figura 4.49a**), la humedad relativa con 0.000004, siendo esta la más baja de las tres y la velocidad del viento con 0.1201 (**Figura 4.49b**), siendo esta la que tiene una determinación más alta, aun así la variable que pudo haber sido la que modificó la concentración de $PM_{2.5}$ es la humedad relativa.

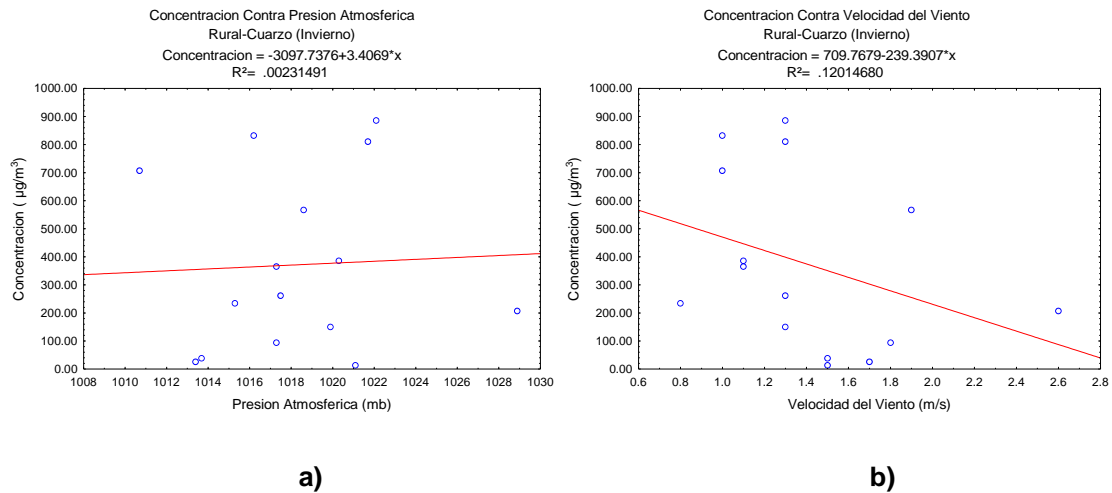


Figura 4.49.- a) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra presión ambiental para la zona rural; b) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra velocidad del viento para la zona rural

II) Filtro de cuarzo

Con el filtro de teflón se usaron las mismas variables que con el filtro de cuarzo con una determinación en conjunto de 0.5074 con un nivel de confianza de 95 %, las R^2 de cada variable fueron: la presión ambiental de 0.0811 (**Figura 4.50a**), la temperatura ambiental con 0.3419 (**Figura 4.50b**), siendo la variable que tuvo determinación más alta y la velocidad del viento con 0.0193, siendo la que tiene la determinación más baja.

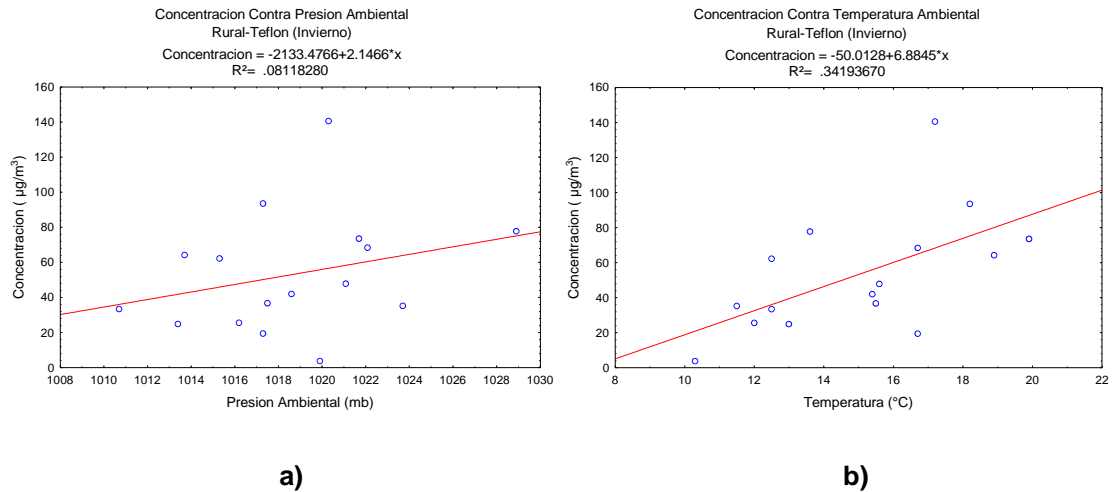


Figura 4.50.- a) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra presión ambiental para la zona urbana; b) Determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ contra temperatura del aire para la zona urbana

Al igual que en la zona urbana la variable atmosférica que mas influenció el filtro de cuarzo es la humedad relativa mientras que la velocidad del viento, lo hizo con el filtro de cuarzo.

4.2.2.- Resultados de la zona urbana

A) Análisis gravimétrico

En la **Tabla 4.25** se dan los resultados para los filtros de cuarzo y su análisis gravimétrico:

Tabla 4.25.- Análisis gravimétrico para los filtros de cuarzo para la zona rural

No de Filtro:	Peso Inicial:	Peso Final:	Diferencia de Peso
Urb - 01 - Cua	148.85	153.673	4.823000
Urb - 02 - Cua	146.524	152.407	5.883000
Urb - 03 - Cua	146.015	150.744	4.729000
Urb - 04 - Cua	146.126	149.751	3.625000
Urb - 05 - Cua	145.08	146.821	1.741000
Urb - 06 - Cua	138.62	139.704	1.084000
Urb - 07 - Cua	142.403	147.57	5.167000
Urb - 08 - Cua	143.8	144.336	0.536000
Urb - 9 - Cua	147.538	154.366	6.828000
Urb - 10 - Cua	147.203	150.688	3.485000
Urb - 11 - Cua	146.092	146.753	0.661000
Urb - 12 - Cua	145.484	145.488	0.004000
Urb - 13 - Cua	145.817	146.4	0.583000
Urb - 14 - Cua	147.313	148.064	0.751000
Urb - 15 - Cua	145.462	146.281	0.819000
Urb - 16 - Cua	145.742	146.053	0.311000

En la **Tabla 4.26** se dan los resultados para los filtros de teflón y su análisis gravimétrico:

Tabla 4.26.- Análisis gravimétrico para los filtros de teflón para la zona rural.

No de Filtro:	Peso Inicial:	Peso Final:	Diferencia de Peso:
Urb - 01 - Tef	140.129	142.843	2.714000
Urb - 02 - Tef	140.637	140.898	0.261000
Urb - 03 - Tef	140.327	140.691	0.364000
Urb - 04 - Tef	140.431	141.433	1.002000
Urb - 05 - Tef	139.99	140.713	0.723000
Urb - 06 - Tef	140.54	140.524	-0.016000
Urb - 07 - Tef	140.08	140.537	0.457000
Urb - 08 - Tef	140.886	141.335	0.449000
Urb - 9 - Tef	140.779	141.293	0.514000
Urb - 10 - Tef	140.444	140.621	0.177000
Urb - 11 - Tef	141.487	141.648	0.161000
Urb - 12 - Tef	139.92	140.028	0.108000
Urb - 13 - Tef	139.62	139.688	0.068000
Urb - 14 - Tef	139.882	140.02	0.138000
Urb - 15 - Tef	139.75	139.945	0.195000
Urb - 16 - Tef	139.994	140.262	0.268000

Con los resultados del análisis gravimétrico se procedió a sacar el flujo final, para lo cual se usaron las siguientes constantes

Para el muestreador con filtro de cuarzo:

m_{vol} : 0.9854; b_{vol} : 0.5487 y Q_{ind} : 5 L/min

Para el muestreador con filtro de teflón:

m_{vol} : 1.0015; b_{vol} : 0.4064 y Q_{ind} : 5 L/min

Se usaron los datos de la presión atmosférica y temperatura ambiental, tomados de la estación de monitoreo de la UABC en Mexicali.

En las **Tablas 4.27** y **4.28** se muestran los resultados sacados de flujo final en los filtros de cuarzo y teflón.

Tabla 4.27.- Q_{fin} (flujo patrón) del muestreador que contenía el filtro de cuarzo para la zona urbana

Pact	Pest	Tact	Test	(MvolQind + Bvol)	Pres atm 1	Tem Atm 1	PA * TA	(PA * TA) ^{1/2}	Qact
1018	1013	14,3	24,85	5,4757	0,9951	0,5755	0,5726	0,7567	6,2324
1024	1013	13,1	24,85	5,4757	0,9893	0,5272	0,5215	0,7221	6,1978
1027	1013	12,4	24,85	5,4757	0,9864	0,4990	0,4922	0,7016	6,1773
1027	1013	14,5	24,85	5,4757	0,9864	0,5835	0,5755	0,7586	6,2343
1027	1013	15	24,85	5,4757	0,9864	0,6036	0,5954	0,7716	6,2473
1033	1013	19,1	24,85	5,4757	0,9806	0,7686	0,7537	0,8682	6,3439
1030	1013	18,3	24,85	5,4757	0,9835	0,7364	0,7243	0,8510	6,3267
1026	1013	18,2	24,85	5,4757	0,9873	0,7324	0,7231	0,8504	6,3261
1028	1013	18,3	24,85	5,4757	0,9854	0,7364	0,7257	0,8519	6,3276
1028	1013	20,3	24,85	5,4757	0,9854	0,8169	0,8050	0,8972	6,3729
1022	1013	20,6	24,85	5,4757	0,9912	0,8290	0,8217	0,9065	6,3822
1024	1013	18,5	24,85	5,4757	0,9893	0,7445	0,7365	0,8582	6,3339
1020	1013	17,4	24,85	5,4757	0,9931	0,7002	0,6954	0,8339	6,3096
1033	1013	12,3	24,85	5,4757	0,9806	0,4950	0,4854	0,6967	6,1724
1029	1013	16,4	24,85	5,4757	0,9845	0,6600	0,6497	0,8060	6,2817
1024	1013	17,8	24,85	5,4757	0,9893	0,7163	0,7086	0,8418	6,3175

Tabla 4.28.- Qfin (flujo patrón) del muestreador que contenía el filtro de teflón para la zona urbana

Pact	Pest	Tact	Test	(MvolQind + Bvol)	Pres atm 1	Tem Atm 1	PA * TA	(PA * TA)1/2	Qact
1018	1013	14,3	24,85	5,4139	0,9951	0,5755	0,5726	0,7567	6,1706
1024	1013	13,1	24,85	5,4139	0,9893	0,5272	0,5215	0,7221	6,1360
1027	1013	12,4	24,85	5,4139	0,9864	0,4990	0,4922	0,7016	6,1155
1027	1013	14,5	24,85	5,4139	0,9864	0,5835	0,5755	0,7586	6,1725
1027	1013	15	24,85	5,4139	0,9864	0,6036	0,5954	0,7716	6,1855
1033	1013	19,1	24,85	5,4139	0,9806	0,7686	0,7537	0,8682	6,2821
1030	1013	18,3	24,85	5,4139	0,9835	0,7364	0,7243	0,8510	6,2649
1026	1013	18,2	24,85	5,4139	0,9873	0,7324	0,7231	0,8504	6,2643
1028	1013	18,3	24,85	5,4139	0,9854	0,7364	0,7257	0,8519	6,2658
1028	1013	20,3	24,85	5,4139	0,9854	0,8169	0,8050	0,8972	6,3111
1022	1013	20,6	24,85	5,4139	0,9912	0,8290	0,8217	0,9065	6,3204
1024	1013	18,5	24,85	5,4139	0,9893	0,7445	0,7365	0,8582	6,2721
1020	1013	17,4	24,85	5,4139	0,9931	0,7002	0,6954	0,8339	6,2478
1033	1013	12,3	24,85	5,4139	0,9806	0,4950	0,4854	0,6967	6,1106
1029	1013	16,4	24,85	5,4139	0,9845	0,6600	0,6497	0,8060	6,2199
1024	1013	17,8	24,85	5,4139	0,9893	0,7163	0,7086	0,8418	6,2557

Una vez que se obtuvo el flujo final se procedió a sacar la concentración de partículas menores a 2.5 micrómetros.

En las **Tablas 4.29 y 4.30** se dan las concentraciones de PM_{2.5} en los filtros de teflón y cuarzo.

Tabla 4.29.- Concentraciones de las PM_{2.5} con el filtro de cuarzo para la zona urbana

Fecha	Flujo Ini	Q act	F patron	Dif de Peso	Peso Pat	Flujo pat2	mg/m3
01-ene-09	5	6.2324	5.6162	4.823000	4823000	8087.3430	596.3640
03-ene-09	5	6.1978	5.5989	5.883000	5883000	8062.4517	729.6788
05-ene-09	5	6.1773	5.5886	4.729000	4729000	8047.6299	587.6264
07-ene-09	5	6.2343	5.6172	3.625000	3625000	8088.7305	448.1544
09-ene-09	5	6.2473	5.6237	1.741000	1741000	8098.0684	214.9895
11-ene-09	5	6.3439	5.6719	1.084000	1084000	8167.5911	132.7197
13-ene-09	5	6.3267	5.6634	5.167000	5167000	8155.2507	633.5795
15-ene-09	5	6.3261	5.6630	0.536000	536000	8154.7642	65.7284
17-ene-09	5	6.3276	5.6638	6.828000	6828000	8155.8464	837.1908
19-ene-09	5	6.3729	5.6865	3.485000	3485000	8188.4935	425.5972
21-ene-09	5	6.3822	5.6911	0.661000	661000	8195.1568	80.6574
23-ene-09	5	6.3339	5.6669	0.004000	4000	8160.3922	0.4902
25-ene-09	5	6.3096	5.6548	0.583000	583000	8142.9149	71.5960
27-ene-09	5	6.1724	5.5862	0.751000	751000	8044.1258	93.3601
29-ene-09	5	6.2817	5.6409	0.819000	819000	8122.8517	100.8267
31-ene-09	5	6.3175	5.6587	0.311000	311000	8148.5897	38.1661

Con los filtros de cuarzo se tuvieron 13 violaciones a la norma mexicana de $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la primera fue el 1 de enero y la última el 21 de enero, el rango fue de $0.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $837.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabla 4.30.- Concentraciones de las $\text{PM}_{2.5}$ con el filtro de teflón para la zona urbana

Fecha	Flujo Ini	Q act	F pat	Dif de Peso	Peso Pat	Flujo pat2	mg/m3
01-ene-09	5	6.1706	5.5853	2.714000	2714000	8042.8470	337.4427
03-ene-09	5	6.1360	5.5680	0.261000	261000	8017.9557	32.5519
05-ene-09	5	6.1155	5.5577	0.364000	364000	8003.1339	45.4822
07-ene-09	5	6.1725	5.5863	1.002000	1002000	8044.2345	124.5613
09-ene-09	5	6.1855	5.5928	0.723000	723000	8053.5724	89.7738
11-ene-09	5	6.2821	5.6410	-0.016000	-16000	8123.0951	-1.9697
13-ene-09	5	6.2649	5.6325	0.457000	457000	8110.7547	56.3449
15-ene-09	5	6.2643	5.6321	0.449000	449000	8110.2682	55.3619
17-ene-09	5	6.2658	5.6329	0.514000	514000	8111.3504	63.3680
19-ene-09	5	6.3111	5.6556	0.177000	177000	8143.9975	21.7338
21-ene-09	5	6.3204	5.6602	0.161000	161000	8150.6608	19.7530
23-ene-09	5	6.2721	5.6360	0.108000	108000	8115.8962	13.3072
25-ene-09	5	6.2478	5.6239	0.068000	68000	8098.4189	8.3967
27-ene-09	5	6.1106	5.5553	0.138000	138000	7999.6298	17.2508
29-ene-09	5	6.2199	5.6100	0.195000	195000	8078.3557	24.1386
31-ene-09	5	6.2557	5.6278	0.268000	268000	8104.0937	33.0697

Mientras en el filtro de teflón solo se violaron en 3 días, siendo el primero el 1 de enero con $337.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el 7 de enero con $124.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el 9 de enero con $89.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el rango fue de $8.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $337.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual evidencia que la concentración de $\text{PM}_{2.5}$ aumentó en invierno respecto al verano.

Así mismo se muestran las graficas de concentración para $\text{PM}_{2.5}$ con los dos filtros usados.

En la **Figura 4.51** se observa como la mayoría de los días se viola la norma mexicana de $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

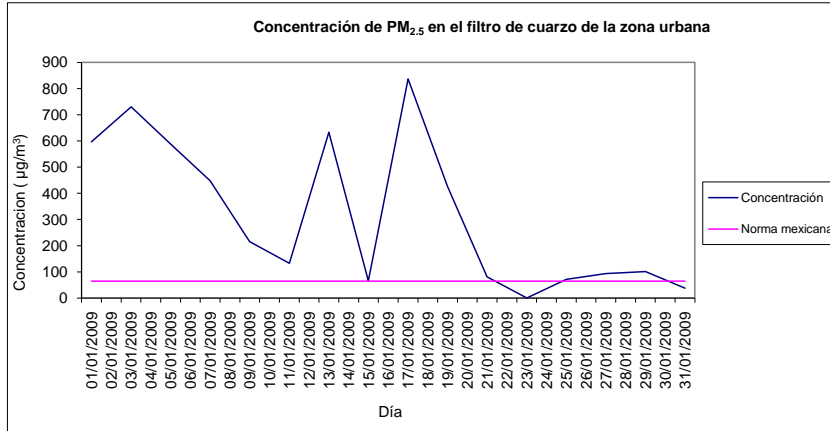


Figura 4.51.- Concentración de PM_{2.5} con el filtro de cuarzo para la zona urbana

En la **Figura 4.52** la concentración de PM_{2.5} se mantuvo alta durante los primeros días del muestreo donde se observó como bajaba desde el 11 de enero y manteniéndose sin problemas hasta la finalización del muestreo.

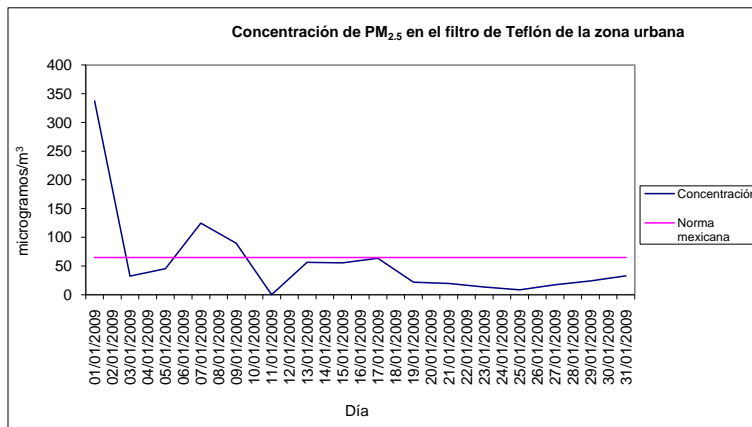


Figura 4.52.- Concentración de PM_{2.5} con el filtro de teflón para la zona urbana

B) Análisis químico

Se analizaron los filtros más representativos de la zona, para lo cual se escogieron las muestras con mayor peso, que fueron analizadas bajo el método EDX.

I) Filtro de teflón:

El filtro de teflón de la zona urbana se tomó el 1 de Enero y tuvo un peso de 2.714 mg con una concentración de $PM_{2.5}$ de $337.44 \mu g/m^3$. En la **Figura 4.53** se muestra el tamaño de las partículas que contiene el filtro de teflón. El tamaño de las partículas van desde los $3.34 \mu m$ a los $6.55 \mu m$.

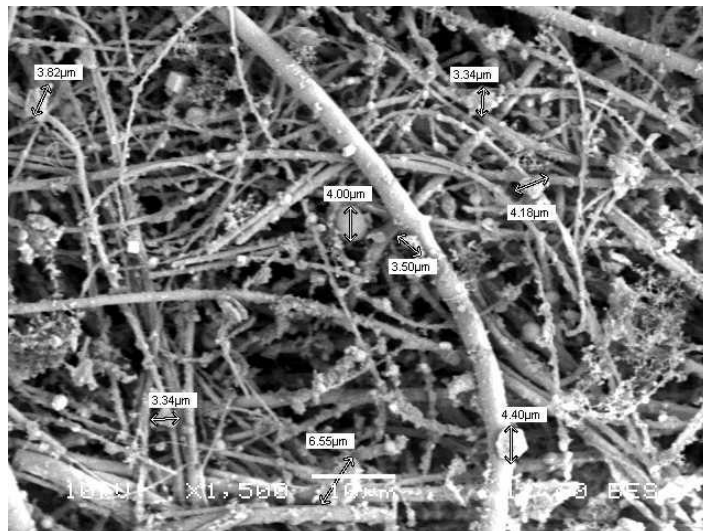


Figura 4.53.- Tamaño de las partículas contenidas en el filtro de teflón para la zona urbana para el día 1 de Enero del 2008

El análisis hecho con el método EDX en una partícula capturada en el filtro da como resultado una concentración de carbono de 35%, silicio con 25%, oxígeno con 17% y el cloro con 12% (**Tabla 4.31**), mientras en la **Figura 4.54** nos muestra el espectro de dispersión de energía dado en KeV.

Tabla 4.31.- Elementos encontrados en el filtro de teflón para la zona urbana

Elemento	% Masa	% Atómico
C	34.37	52.37
O	17.33	19.83
Si	25.28	16.47
Cl	11.52	05.95
K	11.50	05.38

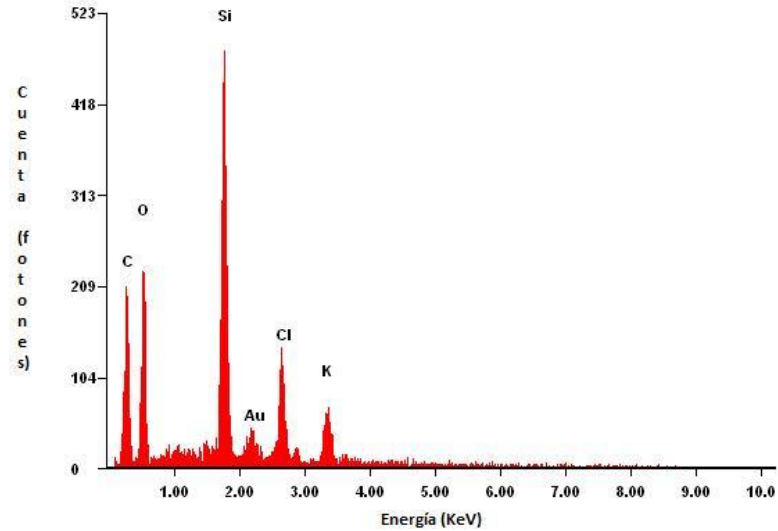


Figura 4.54.- Espectro de dispersión de energía en el filtro de teflón para la zona urbana

II) Filtro de cuarzo:

El filtro de cuarzo de la zona urbana correspondió al 17 de Enero y tuvo un peso de 6.828 mg con una concentración de PM_{2.5} de 837.19 µg/m³. En la **Figura 4.55** se muestra el tamaño de las partículas que contiene el filtro de cuarzo:

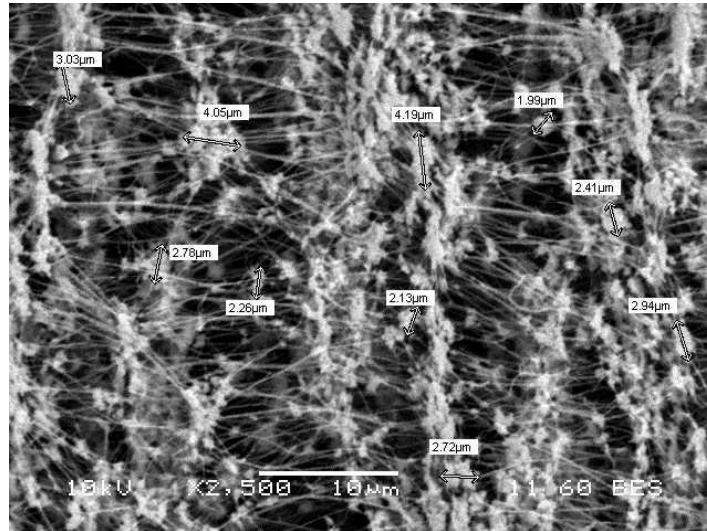


Figura 4.55.- Tamaño de las partículas contenidas en el filtro de cuarzo para la zona urbana para el día 17 de enero del 2008.

El tamaño de las partículas van desde 1.99 a 4.19 μm , lo cual es significativo que en esos días, las partículas menores a 2.5 micras estaban presentes en la atmósfera. El análisis hecho con el método EDX al filtro de cuarzo muestra una diferencia comparado con otros filtros. Este análisis dio como resultado poca variedad de elementos, identificando al hierro como el metal más abundante con 65%, carbono con 33% y por último sodio con 1% (**Tabla 4.32**), mientras en la **Figura 4.56** se tiene el espectro de dispersión de energía.

Tabla 4.32.- Elementos encontrados en el filtro de teflón para la zona urbana

Elemento	% Masa	% Atómico
C K	33.01	43.89
F K	65.62	55.16
NaK	01.37	00.95

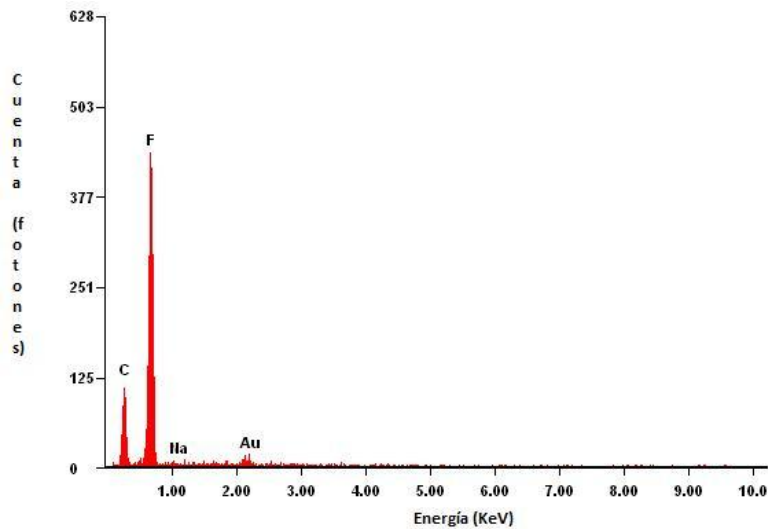


Figura 4.56.- Espectro de dispersión de energía en el filtro de cuarzo para la zona urbana

C) Análisis meteorológico

I) Filtro de cuarzo

En la **Figura 4.57** se observa la relación de la concentración de $PM_{2.5}$ con la temperatura ambiental, donde se notaron que en algunos días las temperaturas altas provocan baja concentración de $PM_{2.5}$. En la **Figura 4.58** se muestra que cuando el viento es más rápido la concentración de $PM_{2.5}$ es baja, mientras que cuando la velocidad del viento es baja la concentración de partículas disminuye y por ultimo en la **Figura 4.59** la humedad parece que no afecta el contenido de material particulado, aunque en algunos casos cuando la humedad relativa sube la concentración aumenta.

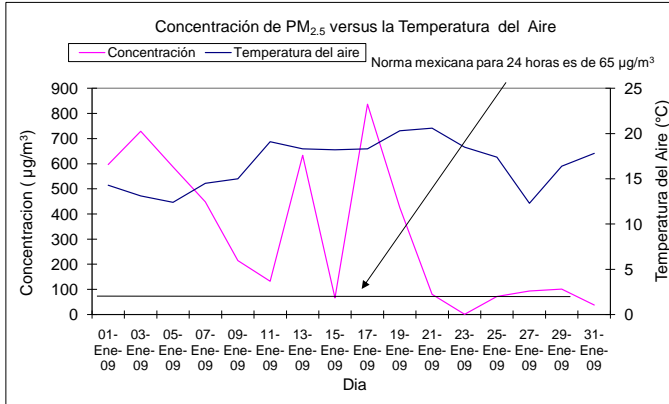


Figura 4.57.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra temperatura del aire para el filtro de cuarzo para la zona urbana

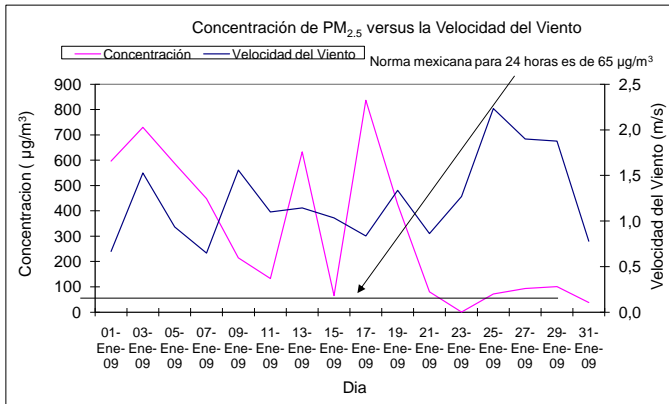


Figura 4.58.- Concentración de $PM_{2.5}$ contra la velocidad del viento para el filtro de cuarzo para la zona urbana

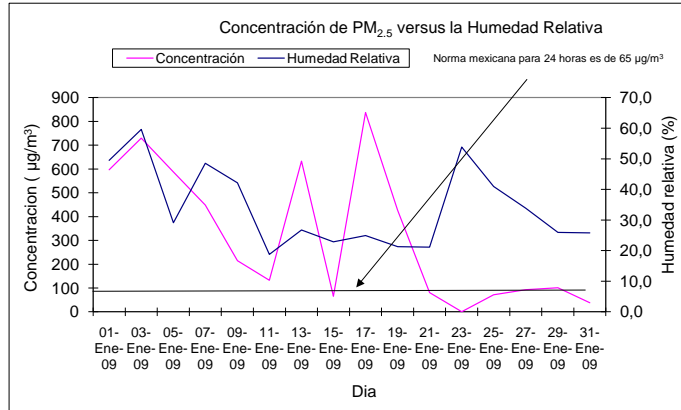


Figura 4.59.- Concentración de PM_{2.5} contra la humedad relativa para el filtro de cuarzo para la zona urbana

II) Filtro de teflón

En la **Figura 4.60** se observa como la Temperatura del aire no influye en la contaminación ambiental producida por las PM_{2.5}, en el caso de la **Figura 4.61**, nos dice que la velocidad del viento solo influye en algunos días del mes a la concentración de PM_{2.5}, mientras en la **Figura 4.62** se observa como la humedad relativa ayuda a disminuir o aumentar el material partícula en algunos días, sobre todo los días al principio de la investigación.

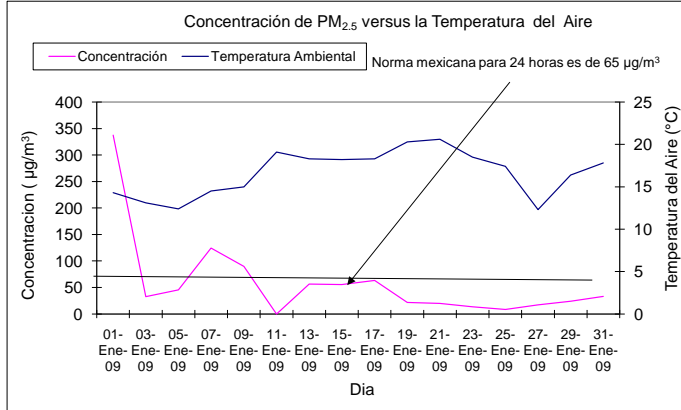


Figura 4.60.- Concentración de PM_{2.5} contra la temperatura del aire para el filtro de teflón para la zona urbana

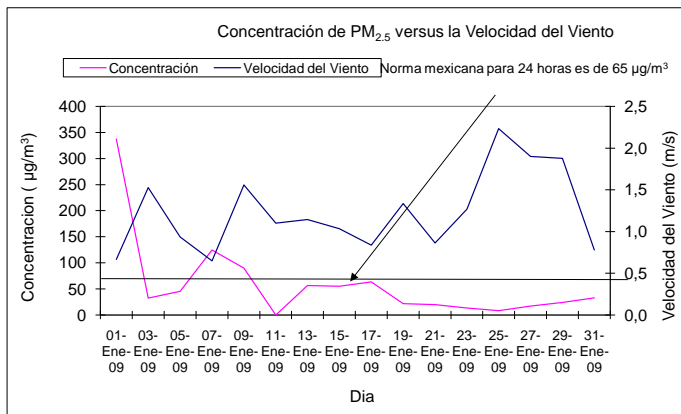


Figura 4.61.- Concentración de PM_{2.5} contra la velocidad del viento para el filtro de teflón para la zona urbana

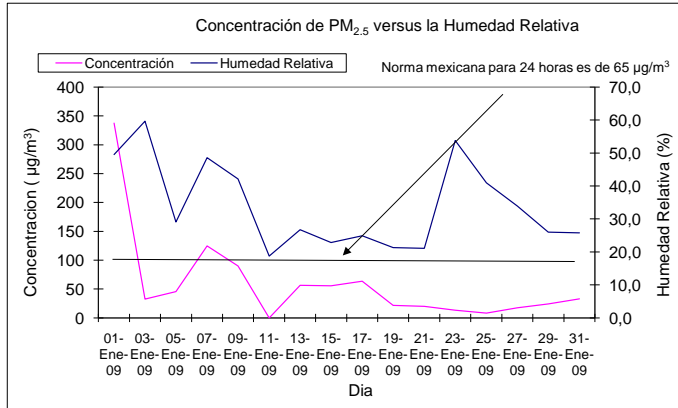


Figura 4.62.- Concentración de PM_{2.5} contra la humedad relativa para el filtro de teflón para la zona urbana

Rosa de los vientos

En lo que se refiere a la rosa de los vientos para la zona urbana la dirección del viento fue principalmente al Este, Este - Noreste y Este - Sureste (**Figura 4.63**), que posiblemente haya traído material particulado del este de la ciudad, tanto de los arenales provenientes del desierto. La diferencia entre direcciones del viento entre la zona urbana y la zona rural se puede deber a el numero de datos que se tuvo para la investigación y a la diferencia de tiempo que se tenía entre ellos, ya que los datos de la zona urbana eran cada minutos en cambio para la zona rural eran por día. La velocidad máxima del viento para la zona urbana no excedió los 2.2 m/s y tuvo una velocidad promedio de 1.2 m/s, menor a lo que tuvo la zona rural.

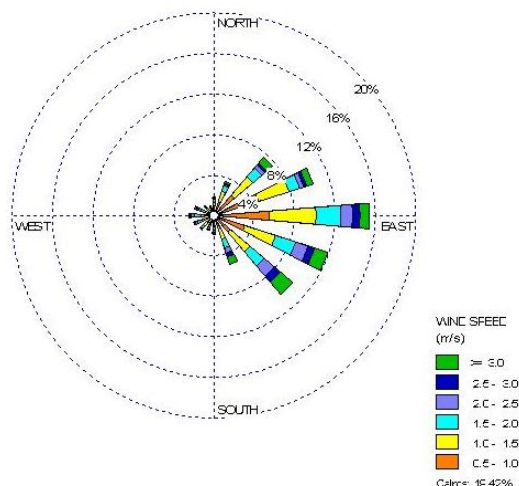


Figura 4.63.- Rosa de los vientos para enero del 2009 para la zona urbana de la ciudad de Mexicali.

D) Análisis Estadístico

La contaminación que llegó a la ciudad proviene de la contaminación industrial y de los residuos de los campos de cultivos, tanto del valle de Mexicali, como del valle Imperial que están al este de la ciudad.

I) Filtro de cuarzo

Para el análisis estadístico se hizo una correlación múltiple con los tres factores atmosféricos, llamados variables independientes, se quitaron aquella o aquellas variables que no tuvieran una determinación alta como para determinar la concentración de $PM_{2.5}$, llamada variable dependiente. Con el filtro de cuarzo las tres variables independientes fueron: temperatura ambiental, humedad relativa y velocidad del viento con una determinación en conjunto de 0.2511 con un nivel de confianza de 95%, las R^2 de las tres variables fueron: la temperatura ambiental con 0.088 (**Figura 4.64a**), La humedad relativa con 0.0383, siendo esta la más baja y la velocidad del viento con 0.1211, siendo la que tiene la determinación más alta (**Figura 4.64b**). Ninguna variable parece determinar la concentración de $PM_{2.5}$.

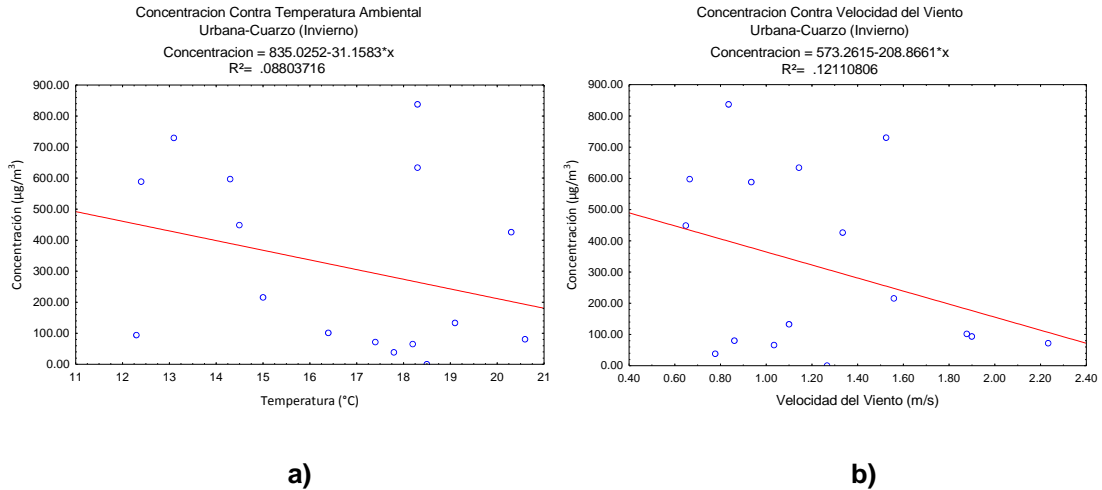


Figura 4.64.- a) Determinación de la concentración de PM_{2.5} contra temperatura del aire para la zona urbana; b) Determinación de la concentración de PM_{2.5} contra velocidad del viento para la zona urbana

II) Filtro de teflón

Con el filtro de teflón se tomaron las mismas variables que con el filtro de cuarzo las cuales tuvieron una determinación en conjunto de 0.5262 con un nivel de confianza de 95 %; así las R² de cada variable fueron: la presión ambiental con 0.189 (**Figura 4.65a**), la temperatura ambiental con 0.0898, siendo la que tuvo una determinación más baja y la velocidad del viento con 0.2306, siendo la que tuvo la determinación más alta (**Figura 4.65b**).

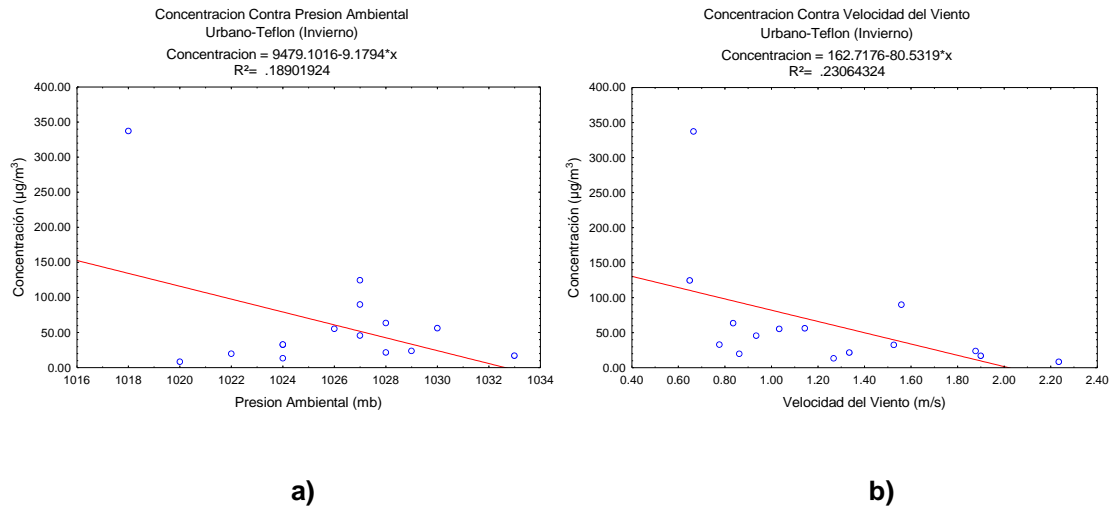


Figura 4.65.- a) Determinación de la concentración de PM_{2.5} contra presión ambiental para la zona urbana; b) Determinación de la concentración de PM_{2.5} contra velocidad del viento para la zona urbana

Es importante mencionar que la variable atmosférica que más influye en el filtro de cuarzo es la humedad relativa mientras en el filtro de teflón es la velocidad del viento.

4.3.- Análisis de la información de PM_{2.5} (BAM) encontrada en el Sistema de Calidad del Aire de los Estados Unidos (AQS “Air Quality System”)

El sistema de calidad del aire (AQS) recoge los datos de la contaminación atmosférica del estado recogidos por EPA, de millares de estaciones de supervisión instaladas en USA, incluyendo franja fronteriza, además de algunos estados mexicanos. AQS también contiene datos meteorológicos, la información descriptiva sobre cada estación de supervisión (su localización geográfica incluyendo y su operador), y la garantía de calidad de datos/la información del control de calidad. (EPA, 2010)

Para iniciar el análisis de las PM_{2.5} se utilizó la información de la base de datos de AQS como se muestra en la **Tabla 4.31** (EPA, 2010), de la cual se seleccionó la correspondiente a la estación de monitoreo de la UABC ya que es la única de

Mexicali de las 4 estaciones que lleva a cabo este registro de PM_{2.5}, obtenidos a partir de la base de datos de AQS como se muestra en la **Tabla 4.32**.

Tabla 4.31.- Datos de AQS

Monitor ID	Daily Coll. Date	Duration	EDT ID	Daily Arith Mean
80-002-0012-88501-3	20070706	24-HR BLK AVG	0	63.3000
80-002-0012-88501-3	20070709	24-HR BLK AVG	0	50.7000
80-002-0012-88501-3	20070710	24-HR BLK AVG	0	53.7000
80-002-0012-88501-3	20070711	24-HR BLK AVG	0	49.7000
80-002-0012-88501-3	20070712	24-HR BLK AVG	0	23.0000
80-002-0012-88501-3	20070713	24-HR BLK AVG	0	51.9000
80-002-0012-88501-3	20070714	24-HR BLK AVG	0	46.0000
80-002-0012-88501-3	20070715	24-HR BLK AVG	0	46.7000
80-002-0012-88501-3	20070716	24-HR BLK AVG	0	46.7000
80-002-0012-88501-3	20070717	24-HR BLK AVG	0	45.1000
80-002-0012-88501-3	20070718	24-HR BLK AVG	0	50.2000
80-002-0012-88501-3	20070719	24-HR BLK AVG	0	54.4000
80-002-0012-88501-3	20070720	24-HR BLK AVG	0	73.0000
80-002-0012-88501-3	20070721	24-HR BLK AVG	0	45.5000
80-002-0012-88501-3	20070722	24-HR BLK AVG	0	36.7000

Tabla 4.32.- Promedio mensual del mes de julio del 2007

Monitor	Daily Coll.	Daily Arith Mean	Daily % Obs
ID	Date	Mean	Obs
80-002-0012-88501-3		5	68.5
80-002-0012-88501-3		6	63.3
80-002-0012-88501-3		9	50.7
80-002-0012-88501-3		10	53.7
80-002-0012-88501-3		11	49.7
80-002-0012-88501-3		12	23
80-002-0012-88501-3		13	51.9
80-002-0012-88501-3		14	46
80-002-0012-88501-3		15	46.7
80-002-0012-88501-3		16	46.7
80-002-0012-88501-3		17	45.1
80-002-0012-88501-3		18	50.2
80-002-0012-88501-3		19	54.4
80-002-0012-88501-3		20	73
80-002-0012-88501-3		21	45.5
80-002-0012-88501-3		22	36.7
80-002-0012-88501-3		23	49
80-002-0012-88501-3		24	47.3
80-002-0012-88501-3		28	43
80-002-0012-88501-3		29	36.5
80-002-0012-88501-3		30	60
80-002-0012-88501-3		31	57.1
Promedio Mensual de pm2.5			49.91

Una de las limitaciones en el análisis de la información es que se encontraron varios meses sin datos, en la **Figura 4.66** se muestra lo que se detectó en el mes de septiembre del año 2007

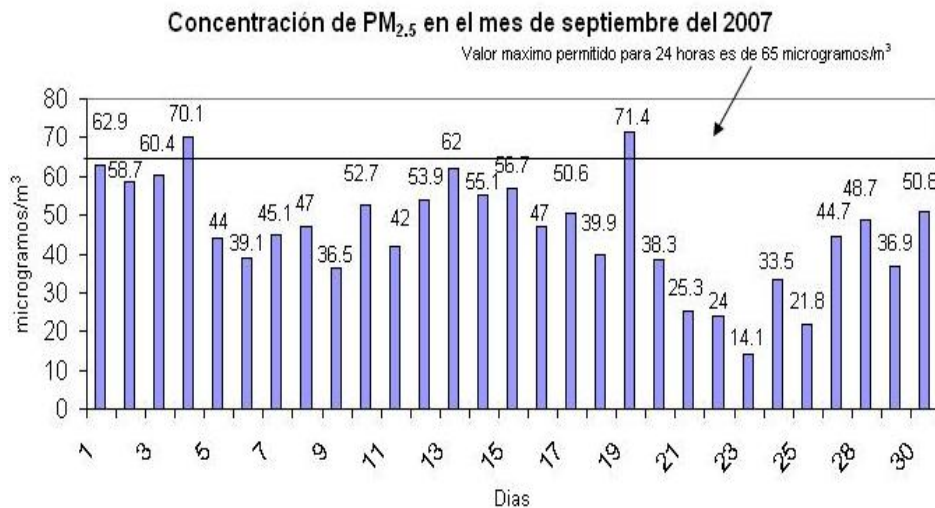


Figura 4.66.- Concentración de PM_{2.5} durante el mes de septiembre del 2007 para la ciudad de Mexicali

De los datos analizados de $PM_{2.5}$ del 2003 al 2008 (**Tabla 4.33**) se observaron ausencia de datos en algunos meses de los años bajo estudio por razones de operatividad del sistema de muestreo. En la **Figura 4.67** se observaron excedentes a la norma para $PM_{2.5}$ para cada uno de los años estudiados. En la **Figura 4.68** se muestra la tendencia histórica de días violados de 2003 al 2008.

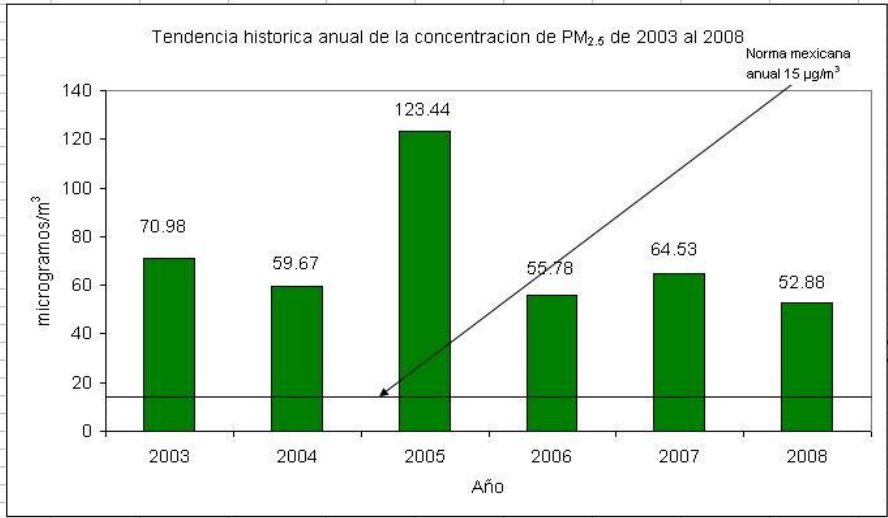


Figura 4.67.- Tendencia histórica anual de Concentración de $PM_{2.5}$ de 2003 al 2008 para la ciudad de Mexicali



Figura 4.68.- Tendencia de días violados de $PM_{2.5}$ de 2003 al 2008 para la ciudad de Mexicali

Tabla 4.33.- Datos de la AQS de Airs de la USEPA de 2003 al 2008 para la ciudad de Mexicali

	UABC 2003	UABC 2004	UABC 2005	UABC 2006	UABC 2007	UABC 2008
Enero	82.24	64.59	*	*	*	58.13
Febrero	*	39.9	*	68.11	*	56.57
Marzo	*	56.31	*	39.85	*	46.20
Abril	*	41.39	*	*	*	*
Mayo	*	49.47	*	*	*	*
Junio	*	48.28	*	*	*	*
Julio	*	42.12	65	*	49.91	*
Agosto	*	51.55	*	*	55.65	*
Septiembre	*	62.73	*	*	45.97	*
Octubre	61.91	43.6	139.9	*	64.51	*
Noviembre	53.48	91.71	*	*	87.33	*
Diciembre	68.00	No hay datos	*	*	78.67	*
Totales	66.41	53.79	102.45	53.98	63.68	53.63

* No hay datos registrados

V.- CONCLUSIONES

5.1.- Conclusiones

Ciudad – Valle

La zona rural y la zona urbana están enclavados en un mismo valle es por esto que sus características geográficas y meteorológicas son tan similares. Aunque es menester hacer notar algunas diferencias respecto a la humedad relativa (Hr), la temperatura del aire (Ta) y la velocidad del viento (Vv). Esto último se da como resultado del tamaño de población, de la rugosidad de la ciudad, esto es el exceso de construcciones que provocan cambios repentinos de Ta, Vv y dirección de viento. Según los datos tomados, la Hr del valle es más alta que de la ciudad, producto de su cercanía al Golfo de California y a la cantidad de hectáreas regadas por gravedad.

Asimismo, cabe destacar que las diferencias mostradas en los resultados obtenidos en el valle y la ciudad, se deben principalmente a la Ta, ya que la ciudad es más caliente, por el fenómeno de la isla de calor, además de que la proximidad a campos de cultivos hace que el valle tenga una humedad relativa más alta, según comparaciones de Hr de la zonas urbana y rural. Sumado a todo esto, según los datos tomados en las dos campañas, la concentración de $PM_{2.5}$ fue más alta en invierno que en otoño, esto podría ser causado porque las variables atmosféricas en invierno están más directamente asociadas a la concentración de partículas que en otoño, debido a que el acarreo de material particulado del norte se dió hacia al valle y zona urbana de Mexicali, capturado en los filtros.

Tipo de filtros

Las diferencias de niveles de $PM_{2.5}$ entre la zona urbana y zona rural son más notorias en los filtros de cuarzo que en los filtros de teflón, llegando a la conclusión

que los filtros de teflón son más confiables a la hora de hacer trabajos de comparación de niveles de material particulado, debido posiblemente a las características propias del filtro.

Los niveles de $PM_{2.5}$ registrados en las estaciones de las dos zonas de estudios para cada temporada fueron:

- Verano – otoño: zona urbana/cuarzo = $77.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$; zona urbana/teflón = $33.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$; zona rural/cuarzo = $72.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$; zona rural/teflón = $32.69 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Invierno: zona urbana/cuarzo = $316 \mu\text{g}/\text{m}^3$; zona urbana/teflón = $62.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$; zona rural/cuarzo = $371.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$; zona rural/teflón = $53.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Violaciones a la norma

En lo referente a la norma mexicana para las $PM_{2.5}$ (NOM-025-SSA1-1993) para la temporada de verano – otoño hubo en total nueve violaciones (cuatro para la zona urbana/cuarzo, una para la zona rural/teflón y cuatro para la zona rural/cuarzo) en cambio en la temporada de invierno hubo en total 33 violaciones (tres para la zona urbano/teflón, 13 para la zona urbano/cuarzo, cinco para la zona rural/teflón y 12 para la zona rural/cuarzo).

Esto demuestra que la contaminación aumenta en la temporada de invierno respecto a la de verano, debido a los cambios atmosféricos que son comunes de invierno a verano y que la zona urbana a comparación de la zona rural es el lugar más contaminado de la región debido a la contaminación procedente de varias fuentes, donde destacan el tráfico vehicular y las plantas industriales entre otras.

Filtro teflón-cuarzo

Según los resultados obtenidos en la temporada de invierno, el filtro de cuarzo no es confiable para un muestreo como el desarrollado en este trabajo debido a que reacciona muy fácilmente con la Hr. Tomando en cuenta esto, el filtro de teflón es el idóneo para realizar investigación de niveles de material particulado.

Velocidad del viento, Hr, Ta vs concentración de partículas.

A lo largo de esta investigación destacó la importancia del viento, ya que como se mostró en las gráficas correspondientes (# de Figuras) se pudo percibir que a un aumento en la Vv correspondía a una disminución en la concentración de partículas menores a 2.5 micrómetros, en cambio a una disminución de la Vv correspondía un aumento en su concentración.

Otras variables ambientales que podrían influir en la concentración de $PM_{2.5}$ son la Ta y Hr. Parecería que la temperatura ambiental es la que controla significativamente si la humedad relativa afecta o no afecta a la concentración de material particulado; además esto se confirma mediante los datos obtenidos en AQS, que muestra cuando la temperatura ambiental es baja (invierno) la concentración de $PM_{2.5}$ es alta, en cambio cuando la temperatura ambiental es alta (verano) la concentración de $PM_{2.5}$ es baja en los dos tipos de filtros.

Relevancia del factor ciudad y rural

Es importante destacar que la concentración de partículas asociada a la zona urbana (# de Figuras), está relacionada a la cercanía al boulevard Benito Juárez, lo cual pudo haber contribuido a que algunos días aumentase la concentración de $PM_{2.5}$ debido al elevado tránsito de la flota vehicular, ya sea por las descargas de partículas generadas por el motor o por la resuspensión de polvo callejero generado por los automóviles al pasar.

En el valle de Mexicali los caminos sin pavimentar, la quema de residuos agrícolas y los hornos ladrilleros causaron un aumento en la concentración de $PM_{2.5}$. Esto se comprueba ya que en los días en los cuales se observaron este último par de actividades mencionadas se dió un aumento en la captación de partículas, en cambio en los días previos la concentración fue relativamente baja.

Filtros vs variables meteorológicas

El análisis estadístico muestra a la presión atmosférica (Pa) para el filtro de cuarzo y la Hr para el filtro de teflón como las variables que más influyen en la concentración de $PM_{2.5}$ de los filtros en verano, mientras en invierno, las variables que más influyen son las Ta para la concentración de $PM_{2.5}$ en los filtros de teflón y Vv para la concentración de $PM_{2.5}$ en los filtros de cuarzo.

Este análisis estadístico demuestra que algunos factores atmosféricos influyeron más que otros en la concentración de $PM_{2.5}$ en los dos tipos de filtros tanto en la temporada de verano – otoño como la de invierno. La Pa resultó la más determinante en verano, mientras la Vv en invierno. Con esto se puede percibir que en algunos casos es necesaria la interacción de los cuatro factores atmosféricos y la dirección del viento para poder influir en la disminución o aumento del material particulado en las dos zonas estudiadas.

Elementos identificados usando el EDX

En el análisis químico se identificó C, Si, K, Al, y en algunos casos Mg, Na, Cl, Ca y F, donde el carbono y el silicio fueron los más abundantes, probablemente debido a la contaminación procedente de los campos de cultivo tanto del norte y sur de la ciudad, ya que una gran mayoría de los cultivos del valle usan fertilizantes que son difíciles de asimilar por el suelo agrícola y las plantas y son arrastrados por el viento.

Los diferentes elementos encontrados en cada filtro se deben principalmente a las diversidad de la composición de las partículas atrapadas, así en los filtros de cuarzo se presenta el flúor en mayor cantidad que en los filtros de teflón, tanto en la zona urbana como rural en la temporada de verano – otoño. En cambio el flúor solo se presentó en los filtros de cuarzo en la temporada de invierno. El carbono y el silicio son los elementos más abundantes en los filtros tanto de la zona urbana como de la zona rural en las dos temporadas, ocupando en la mayoría de los casos más del 30% de la masa de la partícula analizada.

El sodio y el calcio son elementos que solo se presentan en los filtros de cuarzo de la temporada de verano - otoño, aunque no pasa de 5% de la masa de la partícula, mientras estos mismos elementos solo se presentan en la zona rural de la temporada de invierno. El aluminio se presenta tanto en los filtros de la zona urbana como la zona rural de la temporada de verano – otoño, mientras el aluminio solo se presenta en la zona rural de la temporada de invierno.

El potasio se presenta en todos los filtro tanto en la temporada de verano – otoño como al de invierno exceptuando en el filtro de cuarzo de la zona urbana de la temporada de invierno. El fierro se presenta solamente en el filtro de teflón de la zona rural de la temporada de invierno.

El tamaño de las partículas encontradas en los filtro de teflón osciló de 3 a 5 μm , en cambio con los filtro de cuarzo los diámetros variaron desde 2 μm hasta 14 μm . El tamaño de las partículas en los filtros se deriva del material propio de los desiertos que rodean a los valles de Mexicali e Imperial, que constituye la fracción mayoritaria del material particulado, sus medidas van desde 1.5 hasta 14.2 μm .

Por todo lo antes descrito, se hace notar que Mexicali tiene una alta contaminación por material particulado, donde destacan mas las PM_{10} comparadas con las $\text{PM}_{2.5}$, haciendo notar que esto se debe a la forma azarosa en que fueron observadas las

partículas bajo el microscopio, aparte de que comúnmente las $PM_{2.5}$ representan una porción de las PM_{10} .

5.2.- Composición química

Según la caracterización química llevada a cabo por Mendoza (2010), en sus filtros de cuarzo y teflón se vieron dominados por una alta concentración de compuestos orgánicos y carbón elemental, así como de cationes y aniones tales como: NO_3^- , K^+ , SO_4^{2-} , y NH_4^+ . La presencia del carbón generalmente indica presencia de procesos de combustión en áreas industriales y urbanas. El origen principal del carbón elemental son los escapes de los vehículos (vehículos de gasolina y diesel) quema de madera, y quema de llantas. Adicionalmente, los estudios indican que el K^+ es uno de los componentes de las prácticas de quema de residuos agrícolas. Finalmente, NO_3^- , SO_4^{2-} y NH_4^+ provienen principalmente de nitrato de amonio y sulfato de amonio preferentemente. Basado en esto el origen principal de las $PM_{2.5}$ proviene de emisiones industriales y de automóviles, actividades de quema y formación secundaria de contaminantes.

Los componentes químicos se clasificaron en material geológico (MG), material orgánico (MO), elementos trazas (ET), nitrato de amonio (NH_4NO_3), sulfato de amonio [$(NH_4)_2SO_4$], sales minerales (sales) y carbón elemental (CE).

En base a los elementos identificados en los análisis de los filtros, y asociándolos a su potencial origen los resultados obtenidos identifican al material orgánico como el principal contaminante con un 61.2 % en otoño, mientras en primavera con un promedio de 55.7%. Al material geológico con 5.4% en otoño y 10.2% en primavera.

En ese tenor se asocia al sulfato de amonio [$(NH_4)_2SO_4$] con 5.5% en otoño y en primavera con 16.3%. El nitrato de amonio (NH_4NO_3) con 11.7% en otoño, mientras en primavera con un 7%. A los elementos traza con 0.8% para otoño y

1.3% para primavera: Las sales con 6.9% para otoño y 3.8% para primavera. Y por último el carbón elemental con un promedio de 8.5 para otoño, mientras en primavera un 5.6%.

5.3.- Alcances y limitaciones

Alcances:

- Se puede comparar los niveles de $PM_{2.5}$ entre la zona rural y zona urbana de la ciudad de Mexicali.
- Se puede comparar los niveles de $PM_{2.5}$ entre los filtros de cuarzo y los filtros de teflón.
- Se logra establecer que los niveles de material particulado es mayor que en la ciudad que en el valle.
- Se estableció que algunos factores atmosféricos difieren de la urbana a la zona rural, por las características propias de cada lugar (tamaño de población, edificaciones, pavimentación, entre otras) .
- Se evidencio que la contaminación de aire es mayor en la temporada de invierno que en la temporada de verano – otoño.
- El análisis químico realizado mediante la técnica de EDX evidenció que tanto en la zona urbana como la zona rural en las dos temporadas se identificaron elementos químicos similares.

Limitaciones:

- Los niveles de $PM_{2.5}$ mostradas en la investigación solo representan a la temporada en estudio.
- Los niveles de $PM_{2.5}$ no pueden ser comparados con otro medio de captación de material particulado, debido al retraso de información de otros equipos.

5.4.- Líneas futuras

- Estudios de PM2.5 de tres zonas de estudio: urbana ,rural de Mexicali y montañosa de la Rumorosa, Tecate.
- Determinar el origen del material particulado de la ciudad de Mexicali, mediante el estudio de modelos de dispersión y su análisis químico.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Ahumada V. S. E., 2007, "Calidad del Aire: pólenes y esporas en Mexicali", Revista Universitaria de la UABC, Vol. 5, No. 58, Abril – Junio, pp. 2 - 7

Airmetrics, 2006, "Minivol Portable Air Sampler, Operation Manual.

Alfaro S.C., Gaudichet A., Gomes L. y Maillé M., 1998, "Mineral aerosol production by wind erosion: Aerosol particle sizes and binding energies". *Geophysical Research Letters* 25, pp. 991-994.

Andreae M.O. y Crutzen P.J, 1997, "Atmospheric aerosols: Biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry". *Science* 276, pp. 1052-1058.

Ángeles G. F., 2006, "Curso: buenas prácticas de muestreo manual de partículas y procedimiento de calibración de equipos de muestreo", Cenica, INE, SEMARNAT, operación manual.

California Air Resources Board (CARB), 2008, "¿Cómo afectan las partículas a mis pulmones?", <http://www.imperialvalleyair.org/es/health.cfm>, 28 de junio.

Carvacho, O. F., Ashbaugh L. L. Y Flocchini, R. G., 2006, "Elemental composition of PM₁₀ and Pm_{2.5} in ambient air downwind of agricultural operations in California's San Joaquin Valley", Management of Natural Resources, Sustainable Development and Ecological hazard., WIT press, pp. 701 – 708.

Chow, J.C. et al, 2000, "Crossborder transport and spatial variability of suspended particles in Mexicali and California's Imperial Valley", Atmospheric Environment, 34, pp. 1833-1843.

Chow, J. C. y Watson J. G., 2006, "Overview of ultrafine particles and human health", Management of Natural Resources, Sustainable Development and Ecological Hazards, WIT Press Edit, 2007, pp, 619 / 632

Chuang C.C., Penner J.E., Taylor K.E., Grossman A.S. y Walton J.J., 1997, "An assessment of the radiative effects of anthropogenic sulfate". *Journal of Geophysical Research* 102, pp. 3761-3778.

Cobo Rivera J. M., 2006, "Caracterización Físicoquímico de las Pinturas Rupestres de Baja California", Tesis de doctorado, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali B.C.

Duce R.A., 1995, "Sources and distributions and fluxes of mineral aerosols and their relationship to climate". In *Aerosol forcing of climate* (ed. Charlson R.J. y Heintzenberg J.), John Wiley & Sons, pp. 43-72.

Enciclopedia de los Municipios de México, 15 de Marzo de 2009, <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/bajacalifornia/municipios/02002a.htm>

EPA, 1996, "Air Quality Criteria for Particulate Matter". EPA. Vol. 1.

EPA, 10 de Diciembre 2009, AQS Web Application Setup, EPA USA, <http://www.epa.gov/ttn/airs/airsaqs/aqsweb/aqswebsetup.htm>

Hansen A.D.A. y Rosen H., 1990, "Individual measurements of the emission factor of aerosol black carbon in automobile plumes". *Journal of the Air and Waste Management Association* 40, pp. 1654-1657.

INE (Instituto Nacional de Ecología), 2009, Inventarios Nacional de Emisiones en Internet: <http://www.ine.gob.mx/dgicur/calair/index.html>

INE (Instituto Nacional de Ecología), 1999, "Programa para Mejorar la Calidad del Aire de Mexicali 2000-2005", Litografía Helio, México, D.F, pp. 30 - 60.

INE (Instituto Nacional de Ecología), 20 de Mayo de 2009, "Sistema nacional de información de la calidad del aire (SINAICA)", <http://sinaica.ine.gob.mx/estandares.html>

INEGI “II Censo Nacional de Vivienda 2005”, 1 de Noviembre de 2007; en Internet <http://www.inegi.gob.mx/inegi/default.aspx>

IPCC, 1996, “IPCC: Climate change. The science of climate change”. Meira Filho LG Houghton JT, Callander BA, Harris N, Kattenberg A, Maskell K (Eds.). Cambridge University Press, pp 584.

Kim E. y Hopke P.K., 2003, “Source identification of Washington DC aerosol using temperature resolved carbon fractions in positive matrix factorization”. Proceedings de la *European Aerosol Conference (EAC 2003)*, Madrid, 911-913,

Künzli N., Kaier R., Medina S., Studnicka M., Chanel O., Filliger P., Herry M., Jr F.H., Puybonnieux-Texier V., Quénel P., Schneider J., Seethaler R., Vergnaud J.C. y Sommer H., 2000, “Public health impact of outdoor and traffic related air pollution: a European assessment”. *The Lancet* 356, 795-801.

La flecha, <http://www.laflecha.net/canales/ciencia/noticias/caracteristicas-de-la-atmosfera-de-la-tierra>, 10 de abril de 2010.

Mandujano F., 2006, “preparación y pesaje de filtros en el muestreo atmosférico”, INE, manual de operación.

Martcorena B., Bergametti G. y Aumont B., 1997, “Modeling the atmospheric dust cycle 2. Simulation of Saharan dust sources”. *Journal of Geophysical Research* 102, pp. 4387-4404.

Mendoza D. A. y Pardo C, E. I., 2004, “Campaña de monitoreo de partículas suspendidas menores a 2.5 micrómetros en Mexicali, B.C.”, V simposio de contaminación atmosférica, UAM Ixtapalapa, libro de resúmenes, pp. 55-59.

Mendoza D. A., Pardo, Erik I, Gutierrez, Adriana A., 2010, “Chemical Characterization and Preliminary source contribution of fine particulate matter in the Mexicali/Imperial Valley border area”, *Journal of the Air and Waste Management Association*, Volume 60, pp. 258 – 270.

Mészáros E., 1993, "Global and Regional Changes in Atmospheric Composition." Lewis Publications, Boca Raton, pp 30.

Mészáros E., 1999, "Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry kadémiai Kiado". Lewis Publications, Boca Raton, pp 56.

Mexicali Emissions Inventory, 2005 (Spanish Version) *Draft Final Report, 2008*, Western Governors' Association Denver, Colorado U.S. Environmental Protection Agency, Region 9 San Francisco, California. Secretaría de Protección al Ambiente de Baja California Mexicali, Baja California, México.

Meulenert Peña, et al, 2007, "Estudio de las inversiones térmicas en la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) y su relación con la calidad del aire". Propuesta de diagnóstico y predicción utilizando el modelo WRF (Weather Research Forecasting)", Instituto de Astronomía y Meteorología, Universidad de Guadalajara.

Moncada A. A., Quintero N. M., 2005, "La Quema agrícola en los valles de Mexicali e Imperial" Revista Universitaria de la UABC, Vol. 3, No. 49, Enero - Marzo, pp. 31 - 35.

Negrete N. D., 2007, "Modelación de la Emisión de Contaminantes NO_x, SO_x, CO, NH₃, COV, PM₁₀ Y PM_{2.5}", Tesis de doctorado, Instituto de Ingeniería, UABC, Pp. 15 - 17.

Osornio-Vargas AR, Flores G. Vazquez I, Sanchez-Perez Y, Garcia-Cuellar C, Serrano J, Rojas Braxcho L, Zuk M..Lopez, Miranda J, Reyna MA, Quintero N. M., Rosas I, 2009. The Role of PM₁₀ size and composition on the celular toxicity induced by samples from an arid region city. Abstract No. 1215. The Toxicologist CD-An Official Journal of the Society of Toxicology, Vol. 108, Number S-1: 253, March.

Pósfai M. y Molnár A., 2000, “*Aerosol particles in the troposphere: a mineralogical introduction*”. Environmental Mineralogy. David J. Vaughan & Roy A. Wogelius. pp. 434.

Ponciano Rodríguez, G., Alfaro Moreno, E., Rosas Pérez I., 2001, “La exposición a partículas atmosféricas” Ciencia y Desarrollo, Julio - Agosto, 4 - 13.

Pope C.A., Burnett R.T., Thun M.J., Calle E.E., Krewski D., Ito K. y Thurston G.D., 2002, “Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution”. *JAMA* 287(9), pp. 1132-1141.

Prospero J.M., 1999, “Long range transport of mineral dust in the global atmosphere: impact of African dust on the environment of the south-eastern United States”, *Proceedings of the National Academy of Science USA* 96, 3396-403.

Putaud J.P., et al .2002, “A European aerosol phenomenology: physical and chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe”. *Eurotrac* European project.

Quintero N. M., Quintana A. T. R., García P. S., 2001, “Las Partículas ambientales al acecho”, *Divulgare*, Año 9, No. 33, Enero - Marzo, pp. 52 - 61.

Quintero N. M., Sweedler A., 2003, “El aire que respiramos en los valles Imperial y Mexicali”, *Revista Universitaria de la UABC*, Año 1, Número 41, Enero – Marzo de 2003, Pág. 42 – 53.

Quintero N. M., Vega R., A., 2006, “Estudio comparativo de tendencias de la calidad del aire de la ciudad de Mexicali (1997 - 2004), en Contaminación y medio ambiente en Baja California, UABC, Editorial Porrúa, Mexicali, Baja California México, Pág. 40.

Reyes Z. E., Vega R. E., Sánchez R. G., Múgica Á. V., 2003, “Contaminación atmosférica por partículas suspendidas en la ZMCM”, *Ciencia y Desarrollo*, Vol. 29, No. 169, Marzo – Abril.

Ruiz O. N. S., Reyna C. M. A., 2006, “Contaminación del ambiente en espacios interiores ¿Es seguro nuestro hogar?”, *Revista Universitaria de la UABC*, Vol. 4, No.4, Abril - Junio, pp. 32- 35.

Seinfeld J.H. y Pandis S.N., 1998, “Atmospheric Chemistry and Physics: from air pollution to climate change”. John Wiley & Sons, Inc., pp 1323.

SINAICA, 15 de noviembre de 2007, “Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire”, http://sinaica.ine.gob.mx/Rosa_de_viento.html

Sloane C.S., Watson J., Chow J., Pritchett L. y Richards L.W., 1991, “Size-segregated fine particle measurements by chemical species and their impact on visibility impairment in Denver”. *Atmospheric Environment* 25 (Part A), pp 1013-1024.

Vedal, S., 1997, “Critical review. Ambient particles and health; Lines that divide”, *J. Air & Waste Management Assoc.*, 47, pp 551-581.

Vallesa S- R. A., Múgica Á. V., Múgica Á. F., 2004, “Aplicación de los modelos de receptor CMB y PCA a datos ambientales de PM_{2.5} en la Ciudad de México”, V simposio de contaminación atmosférica, UAM, Ixtapalapa, libro de resúmenes, pp. 92-95.

Warneck P., 1988, “Chemistry of the natural atmosphere”. *International Geophysics Series*. Wiley & Sons. Vol. 41. Academy Press, pp. 757.

Watson J.G., Zhu T., Chow J.C., Engelbrecht J., Fujita E.M. y Wilson W.E., 2002, “Receptor modeling application framework for particle source attribution”. *Chemosphere* 49, pp. 1093-1136.

White W.H. y Macias E.S., 1989, "Carbonaceous particles and regional haze in the western United States". *Aerosol Science and Technology* 10, pp. 111-117.

WHO, 2003, "Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide". World Health Organization.

Viana R., M del M, "Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores norte y este de la península ibérica y canarias", Tesis de doctorado, Universidad de Barcelona, Barcelona, España, 2003.

Wichmann H.E. y Peters A., 2000, "Epidemiological evidence on the effects of ultrafine particle exposure". *Phil. T. Roy. Soc. A* 358, pp. 2751-2769.

Wolff G.T., Ruthkosky M.S., Stroup D.P. y Korsog P.E., 1991, "A characterization of the principal PM-10 species in Claremont (summer) and Long Beach (fall) during SCAQS". *Atmospheric Environment* 25 Part A, pp. 2173-2186.