



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL-AIRE

**EVALUACIÓN CRONOLÓGICA DEL IMPACTO EN LA CALIDAD DEL AIRE POR
PARTÍCULAS SUSPENDIDAS EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD
DE MÉXICO Y PROPUESTA DE MEDIDAS DE PREVENCIÓN.**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA

LIC. ARISLEIDIS RODRÍGUEZ SOSA

TUTOR PRINCIPAL:

DR. RODOLFO SOSA ECHEVERRÍA, CCA. UNAM.

COMITÉ TUTORAL:

DR. ARMANDO AGUILAR MÁRQUEZ, FES, CUAUTITLÁN. UNAM.

M.C. VICENTE FUENTES GEA, FACULTAD DE INGENIERÍA. UNAM.

DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ, FACULTAD DE INGENIERÍA. UNAM

DR. VÍCTOR ORLANDO MAGAÑA RUEDA, INSTITUTO DE GEOGRAFÍA. UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. AGOSTO, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Víctor O. Magaña Rueda
Secretario: Dra. Georgina Fernández Villagómez
1^{er}. Vocal: Dr. Armando Aguilar Márquez
2^{do}. Vocal: M. C Vicente Fuentes Gea
3^{er}. Vocal: Dr. Rodolfo Sosa Echeverría

Lugar donde se realizó la tesis:

Sección de Contaminación Ambiental, Centro de Ciencias de la Atmósfera,
Universidad Nacional Autónoma de México.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Rodolfo Sosa Echeverría

FIRMA

DEDICATORIA

A mi familia por su cariño, entusiasmo, apoyo y sobre todo por la confianza depositada en mí.

A mi esposo por su gran ayuda con programas para facilitar y agilizar la organización y procesamiento de los datos y sobre todo, por apoyarme emocionalmente y en las tareas del hogar mientras trabajaba en esta investigación.

A todas mis amigas que, de una manera u otra contribuyeron en la realización de esta investigación, en especial: Milena Lemes Rosales, Dalina Rodríguez Sánchez, Anayli Alonso Saranova, Juliet Perdigón Morales, Geidy Rodríguez Vera, Daynier Escalante Pérez y Daymi Ávila Rodríguez.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por ser parte de mi vida académica.

Al programa de Apoyos para Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, por el proyecto "Evaluación del Depósito Atmosférico Húmedo y Seco en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y en la Costa del Golfo de México para la prevención del deterioro ambiental significativo" (IN116215) y al proyecto "Establecimiento de la Red Nacional de Depósito Atmosférico" (IN112318).

Uno muy especial al Dr. Rodolfo Sosa Echeverría por el tiempo dedicado, sus enseñanzas y consejos, por su inmensa paciencia, por todo, ¡Muchas Gracias!

Al Dr. Humberto Bravo Álvarez que, aunque ya no está entre nosotros, me transmitió valiosos consejos y enseñanzas.

A la Sección de Contaminación Ambiental (SCA) del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM: Biól. Pablo Sánchez Álvarez, Dr. Elías Granados Hernández, Dr. Gilberto Fuentes García, M.I. Ana Luisa Alarcón Jiménez, Q.F.B. María del Carmen Torres Barrera, Dra. Elizabeth Vega Rangel y a María de los Ángeles Portillo. A todos, mi sincero agradecimiento por todo su apoyo, observaciones y enriquecedores comentarios durante la realización de esta tesis.

A los miembros del jurado: Dr. Armando Aguilar Márquez, Mr. Vicente Fuentes Gea, Dra. Georgina Fernández Villagómez y al Dr. Víctor O. Magaña Rueda por el tiempo dedicado en la revisión de esta tesis, así como por sus correcciones y sus valiosas sugerencias con el fin de elevar la calidad del presente trabajo.

Al Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT). Especialmente a la Dra. Mónica Jaime Palomera y al meteorólogo Alfredo Alonso Soler. A ambos por recibirme atentamente durante mis visitas al SIMAT, por la facilitación de información y por sus apreciadas recomendaciones y comentarios con el fin de enriquecer la presente investigación.

Tabla de contenido

ÍNDICE DE FIGURAS.....	I
ÍNDICE DE TABLAS	II
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	III
RESUMEN.....	V
ABSTRAC.....	VI
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Problema.....	2
1.2 Justificación del Trabajo.....	2
1.3 Hipótesis	3
1.4 Objetivo Principal.....	3
1.5 Objetivos Específicos.....	3
CAPITULO II. ANTECEDENTES.....	4
2.1 Programas de Calidad del Aire.....	4
2.2 Estudios Realizados.....	9
CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO.....	13
3.1 Partículas Suspendidas.....	13
3.1.1 Partículas Suspendidas Totales (PST).....	14
3.1.2 Partículas Menores a 10 Micrómetros (PM ₁₀).....	14
3.1.3 Partículas Menores a 2.5 Micrómetros (PM _{2.5}).....	15
3.2 Métodos de Medición.....	16
3.2.1 Microbalanza de elemento oscilante.....	17
3.2.2 Atenuación de radiación beta.....	17
3.3 Contaminantes Atmosféricos.....	18
3.4 Fuentes de emisión	19
3.4.1 Fuentes Puntuales o fijas.....	19
3.4.2 Fuentes de Área.....	20
3.4.3 Fuentes Móviles (Vehículos Automotores).....	20
3.4.4 Fuentes Naturales.....	21
3.5 Dispersión de los contaminantes	22
3.5.1 Influencia del viento en la dispersión de los contaminantes en la atmósfera.....	22
3.5.2 Influencia de la Altura de la Capa de Mezcla en la dispersión de los contaminantes.	23
3.5.3 Influencia de la Inversión Térmica en la dispersión de los contaminantes	24
3.6 Impacto Ambiental.....	24
3.6.1 Metodologías de Evaluación del Impacto Ambiental.....	25

3.6.2 Valoración de impactos ambientales	27
3.7 Conceptos Estadísticos	32
3.7.1 Pruebas de Normalidad.....	32
3.7.2 Pruebas de Normalidad (no paramétricas)	33
3.7.3 Comparación de las Pruebas de Normalidad de Anderson –Darling, Kolmogorov-Smirnov y Ryan-Joiner.	34
3.7.4 Estadístico Anderson-Darling.....	34
3.7.5 Pruebas de Minitab	35
3.7.6 Interpretación de los Estadísticos y Gráficas para Pruebas de Normalidad.....	35
3.7.7 Métodos de correlación	37
CAPITULO IV. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	39
4.1 Condiciones Fisiográficas	39
4.2 Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT).....	44
4.3 Condiciones Meteorológicas Típicas.....	45
4.4 Temperatura	46
4.5 Humedad Relativa	47
4.6 Campos de Viento.....	47
4.7 Inversiones Térmicas.....	48
4.8 La Capa de Mezcla	49
4.9 Precipitación.....	50
CAPITULO V. METODOLOGÍA.....	51
5.1 Selección de la Serie Temporal	51
5.1.1 Selección de las Estaciones de Monitoreo	51
5.1.2 Elección de la Compresión de los Datos.....	52
5.2 Validación de la base de datos.....	52
5.3 Análisis Exploratorio de la Serie de Datos de las Estaciones	53
5.4 Valoración cualitativa del impacto en la calidad del aire.....	53
CAPITULO VI. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	57
6.1 Selección de las Estaciones de Monitoreo.....	57
6.2 Comportamiento Multianual de PM_{10} y $PM_{2.5}$	62
6.3 Comportamiento anual de PM_{10} y $PM_{2.5}$	62
6.4 Comportamiento horario de PM_{10} y $PM_{2.5}$	63
6.5 Comportamiento multianual de la Velocidad del Viento, la Temperatura y Capa de Mezcla.....	64
6.6 Comportamiento anual de la Velocidad del Viento, la Temperatura y Capa de Mezcla.	65
6.7 Comportamiento diario de la Velocidad del Viento, la Temperatura y Capa de Mezcla.	66

6.8 Diagramas de Dispersión para PM ₁₀ y PM _{2.5}	67
6.9 Diagramas de Dispersión entre variables.....	69
6.10 Pruebas de Normalidad.....	71
6.11 Selección del método de Correlación	72
6.12 Relación de PM ₁₀ y PM _{2.5} con la dirección del viento.....	75
6.13 Resumen de los Resultados.....	95
6.14 Medidas Propuestas	98
CAPITULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	100
7.1 Conclusiones.....	100
7.2 Recomendaciones.....	101
CAPÍTULO VIII. REFERENCIAS.....	102
ANEXOS.....	108
Anexo 1 Rosa de viento anuales de la estación Tlalnepantla (2008-2015).....	108
Anexo 2 Rosa de viento anuales de la estación Xalostoc (2008-2015).....	109
Anexo 3 Rosa de viento anuales de la estación Merced (2008-2015).....	110
Anexo 4 Rosa de viento anuales de la estación Pedregal (2008-2015)	112
Anexo 5 Rosa de viento anuales de la estación Tláhuac (2008-2015).....	113
Anexo 6 Distribución de frecuencias por categorías de velocidad del viento para las estaciones Tlalnepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Tláhuac para diciembre, enero, abril y mayo. (Período 2008-2015).....	115
Anexo 7 Distribución de frecuencias por categorías de velocidad del viento para las estaciones Tlalnepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Tláhuac para julio, agosto y septiembre. (Período 2008-2015).....	116
Anexo 8 Líneas de flujo e isotacas del viento promedio anual en el Valle de México a las 18:00 y 21:00 horas.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 4.1 UBICACIÓN DE LA ZMCM Y ESTACIONES DE MONITOREO DE LA RAMA.....	40
FIGURA 4.2 CLIMOGRAMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO.	50
FIGURA 6.1 GRÁFICAS DE LÍNEA AJUSTADA PARA LA VELOCIDAD DE VIENTO (PERÍODO 2008-2015).	58
FIGURA 6.2 GRÁFICAS DE LÍNEA AJUSTADA PARA LA TEMPERATURA (PERÍODO 2008-2015).....	59
FIGURA 6.3 GRÁFICA DE LÍNEA AJUSTADA PARA LA PRECIPITACIÓN (PERÍODO 2008-2015).....	60
FIGURA 6.4 ROSAS DE VIENTO MULTIANUALES PARA LAS ESTACIONES TLALNEPANTLA, XALOSTOC, MERCED, PEDREGAL Y TLÁHUAC. (PERÍODO 2008-2015).	61
FIGURA 6.5 PERFIL MULTIANUAL DE PM10 Y PM2.5 EN LA ZMCM PARA EL PERÍODO 2008 – 2015.	62
FIGURA 6.6 PERFIL ANUAL DE PM10 Y PM2.5 EN LA ZMCM PARA EL PERÍODO 2008 – 2015.....	63
FIGURA 6.7 PERFIL DIARIO DE PM10 Y PM2.5 EN LA ZMCM PARA EL PERÍODO 2008 – 2015.	64
FIGURA 6.8 PERFIL MULTIANUAL DE VELOCIDAD DEL VIENTO, TEMPERATURA Y ALTURA DE CAPA DE MEZCLA EN LA ZMCM PARA EL PERÍODO 2008 – 2015.....	65
FIGURA 6.9 PERFIL ANUAL DE VELOCIDAD DEL VIENTO, TEMPERATURA Y ALTURA DE CAPA DE MEZCLA EN LA ZMCM PARA EL PERÍODO 2008 – 2015.....	66
FIGURA 6.10 PERFIL DIARIO DE VELOCIDAD DEL VIENTO, TEMPERATURA Y ALTURA DE CAPA DE MEZCLA EN LA ZMCM PARA EL PERÍODO 2008 – 2015.....	67
FIGURA 6.11 DIAGRAMA DE DISPERSIÓN DE PM10 Y PM2.5 VS Z PARA EL PERÍODO 2008 – 2015.	68
FIGURA 6.12 DIAGRAMA DE DISPERSIÓN DE PM10 Y PM 2.5 VS FF PARA EL PERÍODO 2015-2008.....	68
FIGURA 6.13 DIAGRAMA DE DISPERSIÓN DE PM10 Y PM 2.5 VS T PARA EL PERÍODO 2008 – 2015.	68
FIGURA 6.14 DIAGRAMA DE DISPERSIÓN DE FF VS T PARA EL PERÍODO 2008 – 2015.	69
FIGURA 6.15 DIAGRAMA DE DISPERSIÓN DE Z VS FF PARA EL PERÍODO 2008 – 2015.	70
FIGURA 6.16 DIAGRAMA DE DISPERSIÓN DE Z VS T PARA EL PERÍODO 2008 – 2015.....	70
FIGURA 6.17 GRÁFICA DE PROBABILIDAD PARA EL PERÍODO 2008 – 2015.	71
FIGURA 6.18 GRÁFICA DE PROBABILIDAD PARA EL PERÍODO 2008 – 2015.	72
FIGURA 6.19 ROSAS DE VIENTO PARA LAS ESTACIONES TLALNEPANTLA, XALOSTOC, MERCED, PEDREGAL Y TLÁHUAC PARA EL MES DE DICIEMBRE. (PERÍODO 2008-2015).	77
FIGURA 6.20 ROSAS DE VIENTO PARA LAS ESTACIONES TLALNEPANTLA, XALOSTOC, MERCED Y PEDREGAL PARA EL MES DE ENERO. (PERÍODO 2008-2015).....	79
FIGURA 6.21 ROSAS DE VIENTO PARA LAS ESTACIONES TLALNEPANTLA, XALOSTOC, MERCED PEDREGAL Y TLÁHUAC PARA EL MES DE ABRIL (PERÍODO 2008-2015).	80
FIGURA 6.22 ROSAS DE VIENTO PARA LAS ESTACIONES TLALNEPANTLA, XALOSTOC, MERCED, PEDREGAL Y TLÁHUAC PARA EL MES DE MAYO (PERÍODO 2008-2015).	82
FIGURA 6.23 ROSAS DE VIENTO PARA LAS ESTACIONES TLALNEPANTLA, XALOSTOC, MERCED, PEDREGAL Y TLÁHUAC PARA EL MES DE JULIO. (PERÍODO 2008-2015).	83
FIGURA 6.24 ROSAS DE VIENTO PARA LAS ESTACIONES TLALNEPANTLA, XALOSTOC, MERCED, PEDREGAL Y TLÁHUAC PARA EL MES DE AGOSTO. (PERÍODO 2008-2015).	85
FIGURA 6.25 ROSAS DE VIENTO PARA LAS ESTACIONES TLALNEPANTLA, XALOSTOC, MERCED, PEDREGAL Y TLÁHUAC PARA EL MES DE SEPTIEMBRE. (PERÍODO 2008-2015).....	86

FIGURA 6.26 ROSAS DE VIENTO PARA LAS ESTACIONES TLALNEPANTLA, XALOSTOC, MERCED, PEDREGAL Y TLÁHUAC ENTRE 8:00-10:00 HORAS. (PERÍODO 2008-2015).	87
FIGURA 6.27 ROSAS DE VIENTO PARA LAS ESTACIONES TLALNEPANTLA, XALOSTOC, MERCED, PEDREGAL Y TLÁHUAC ENTRE 10:00-12:00 HORAS. (PERÍODO 2008-2015).	89
FIGURA 6.28 ROSAS DE VIENTO PARA LAS ESTACIONES TLALNEPANTLA, XALOSTOC, MERCED, PEDREGAL Y TLÁHUAC ENTRE 02:00- 04:00 HORAS. (PERÍODO 2008-2015).....	90
FIGURA 6.29 ROSAS DE VIENTO PARA LAS ESTACIONES TLALNEPANTLA, XALOSTOC, MERCED, PEDREGAL Y TLÁHUAC ENTRE 18:00-20:00 HORAS. (PERÍODO 2008-2015).	91
FIGURA 6.30 EPISODIO DE ACTIVACIÓN DEL PROGRAMA DE CONTINGENCIAS AMBIENTALES PARA LAS ESTACIONES PEDREGAL, TLALNEPANTLA, TLÁHUAC, XALOSTOC Y MERCED (DICIEMBRE 2015).....	93
FIGURA 6.31 EPISODIO DE ACTIVACIÓN DEL PROGRAMA DE CONTINGENCIAS AMBIENTALES PARA LAS ESTACIONES MERCED, TLALNEPANTLA Y XALOSTOC (DICIEMBRE 2015).....	93
FIGURA 6.32 ESCENARIO DE PM10 DURANTE LA ACTIVACIÓN DEL PROGRAMA DE CONTINGENCIAS AMBIENTALES POR OZONO, PARA LAS ESTACIONES PEDREGAL, TLALNEPANTLA, TLÁHUAC, XALOSTOC Y MERCED (MARZO 2016).	94
FIGURA 6.33 ESCENARIO DE PM2.5 DURANTE LA ACTIVACIÓN DEL PROGRAMA DE CONTINGENCIAS AMBIENTALES POR OZONO, PARA LAS ESTACIONES MERCED, TLALNEPANTLA Y XALOSTOC (MARZO 2016)..	95

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3.1 NORMA OFICIAL MEXICANA DE SALUD AMBIENTAL.	14
TABLA 3.2 NORMA OFICIAL MEXICANA DE SALUD AMBIENTAL.	15
TABLA 3.3 VALORES ASIGNADOS A LAS CARACTERÍSTICAS DE CADA IMPACTO EN UNA VALORACIÓN CUALITATIVA SIMPLE.	32
TABLA 3.4 CATEGORÍAS DEL ÍNDICE DE CORRELACIÓN DE RHO DE SPEARMAN.....	38
TABLA 4.1 DELEGACIONES Y MUNICIPIOS QUE INTEGRAN A LA ZMCM.	41
TABLA 6.1 CORRELACIÓN DE SPEARMAN PARA PROMEDIOS ANUALES DE PM ₁₀ , PM _{2.5} , Z, FF Y T.	73
TABLA 6.2 CORRELACIÓN DE SPEARMAN PARA PROMEDIOS MENSUALES DE PM ₁₀ , PM _{2.5} , Z, FF Y T.....	73
TABLA 6.3 CORRELACIÓN DE SPEARMAN PARA PROMEDIOS HORARIOS DE PM ₁₀ , PM _{2.5} , Z, FF Y T.	73
TABLA 6.4 DIRECCIÓN DEL VIENTO PREDOMINANTE POR AÑO PARA CADA ESTACIÓN.....	75

GLOSARIO DE TÉRMINOS

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

COFEPRIS: Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios

DIGESA: Dirección General de Salud Ambiental.

SEDEMA: Secretaria de Medio Ambiente

INEGI: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática

INECC: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

INE: Instituto Nacional de Ecología

GDF: Gobierno del Distrito Federal

SMA: Secretaria de Medio Ambiente

CAI: Instituto del Aire Limpio

U.S. EPA: United States Environmental Protection Agency

SIMAT: Sistema de Monitoreo Atmosférico

RAMA: Red Automática de Monitoreo Atmosférico.

REDMET: Red Meteorológica

OMS: Organización Mundial de la Salud

CAM: Comisión Ambiental Metropolitana

CMM: Centro Mario Molina

PROAIRE: Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México.

PICCA: Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

PCAA: Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas

NOM: Norma Oficial Mexicana

IE: Inventario de Emisiones

EIA: Estudio de Impacto Ambiental

PCA: Primera Cumbre de las Américas

ZMCM: Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

MCMA: Mexico City Metropolitan Area

NET: Estación de monitoreo Netzahualcoyotl

XAL: Estación de monitoreo Xalostoc

MER: Estación de monitoreo Merced

CES: Estación de monitoreo Cerro de la Estrella

PED: Estación de monitoreo Pedregal

TLA: Estación de monitoreo Tlalnepantla
TAH: Estación de monitoreo Tláhuac
FF: Velocidad del viento
T: Temperatura
Z: Altura de capa de mezcla
GVT: Gradiente Vertical de Temperatura
µg/m³: Microgramos/ metro cúbico.
PST: Partículas Suspendidas Totales
PM₁₀: Partículas con un diámetro aerodinámico de hasta 10 µm.
PM_{2.5}: Partículas con un diámetro aerodinámico de hasta 2.5 µm.
CO₂: Dióxido de carbono
CH₄: Metano
N₂O: Óxido nitroso
HFC: Hidrofluorocarburos
O₃: Ozono
SO_x: Óxidos de azufre
CO: Monóxido de carbono
NO_x: Óxidos de nitrógeno
HC: Hidrocarburos
COT: carbono orgánico total
EGCA: Estudio Global de la Calidad del Aire
TEOM: Tapered-Element Oscillating Microbalance
LAU: Licencia Ambiental Única
COA: Cédula de Operación Anual
ECDF: función de distribución acumulada empírica
SPSS: Statistical Package for the Social Sciences
WRPLOT: Software que genera Rosas de viento
Minitab: Paquete de software estadístico.
IMECA: Índice Metropolitano de la Calidad del Aire

RESUMEN

La Ciudad de México y su área metropolitana, han venido presentando desde hace varias décadas, problemas ambientales muy significativos. Entre ellos, el deterioro de la calidad del aire debido a la presencia de partículas. A esta situación se le suman condiciones físico geográficas y meteorológicas desfavorables que prevalecen en la zona de estudio. Actualmente se han fomentado los programas existentes y se han implementados nuevos programas con el fin de disminuir la contaminación en la ciudad, sin embargo, los resultados continúan siendo limitados.

El objetivo principal de este trabajo consistió en evaluar cronológicamente el impacto en la calidad del aire por partículas suspendidas y proponer medidas de prevención. Se realizó una evaluación del comportamiento de las partículas suspendidas, así como de las variables meteorológicas y su impacto a partir de sus perfiles temporales y espaciales, diagramas de dispersión, tablas de correlaciones y rosas de viento.

Se concluyó que durante el periodo de estudio, las partículas suspendidas tienen un impacto negativo durante todo el año en la calidad del aire de la ZMCM, favorecido principalmente la velocidad y dirección del viento.

Para prevenir eventos de altas concentraciones de partículas se proponen medidas como: poner especial atención durante el último periodo de la temporada seca ya que los suelos se encuentran erosionados y se ve favorecida la resuspensión del polvo a la atmósfera.

Disminuir las operaciones industriales en horas de la mañana cuando las condiciones de dispersión son desfavorables, tales como, vientos débiles y baja altura de capa de mezcla.

Se recomienda, entre otras acciones hacer un análisis meteorológico que considere procesos como: advección, estabilidad atmosférica, efectos de Isla de Calor, lavado atmosférico de partículas por lluvia.

ABSTRAC

Mexico City and its metropolitan area have been presenting, for several decades, very significant environmental problems. Among them, the deterioration of air quality due to the presence of particles. To this situation are added unfavorable geographical and meteorological conditions that prevail in the study area. Nowadays, the existing programs have been promoted and new programs have been implemented in order to decrease city pollution, nevertheless, the results continue to be limited.

The main goal of this work was to chronologically assess the impact of suspended particles on air quality and propose prevention measures. An evaluation of the behavior of the suspended particles was made, as well as of the meteorological variables and their impact from their temporal and spatial profiles, dispersion diagrams, correlation tables and wind roses.

It was concluded that during the study period, the suspended particles have a negative impact throughout the year on the air quality in MCMA, favored mainly by the speed and direction of the wind.

To prevent events of high concentrations of particles are proposed measures such as: pay special attention during the last period of the dry season as the soils are eroded and the dust's resuspension to the atmosphere is favored and to decrease industrial operations in the morning hours when the dispersion's conditions are unfavorable, such as, low speed winds and low mixing layer height.

It is recommended, among other actions, to make a meteorological analysis that considers processes such as: advection, atmospheric stability, effects of the Island of Heat, atmospheric washing of particles by rain.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

Desde hace varias décadas, uno de los principales problemas ambientales que afectan a la Ciudad de México y su área metropolitana, es el deterioro de la calidad del aire debido a la presencia de contaminantes.

Este problema podría ser una consecuencia del crecimiento desordenado de la ciudad. En ese tenor se pudiera mencionar el transporte público, la invasión de los cauces naturales de los ríos, una demanda inatendida de combustibles más limpios, y el crecimiento del parque vehicular en la medida en que se privilegió el uso del automóvil en detrimento del transporte colectivo.

Consecuentemente se hizo evidente una agudización en las enfermedades respiratorias. La exposición al aire contaminado puede provocar síntomas como: disminución de la capacidad respiratoria, incremento en la frecuencia de enfermedades respiratorias agudas y crónicas, aumento de ataques de asma e incremento de casos de enfermedades cardíacas (COFEPRIS/ DIGESA, 2002).

Lo anterior se debe a que el sistema respiratorio es la principal vía de ingreso de la contaminación al organismo, lo cual puede afectar la función respiratoria y la habilidad del sistema respiratorio para combatir infecciones y eliminar partículas extrañas, incrementando el riesgo para la salud de las personas, principalmente las que padecen algún problema cardio respiratorio. La exposición a largo plazo está ligada a problemas respiratorios y cardiovasculares graves, y en casos extremos a la muerte prematura. (SEMARNAT-SALUD, 2011).

No existe un umbral de contaminación seguro que garantice la ausencia de daños a la salud, por lo que la presencia de contaminantes del aire debe mantenerse al nivel más bajo posible para minimizar el riesgo (CAI, 2013).

Con la intención de proteger a la población, existen normas o estándares que establecen los límites máximos para la concentración en el aire de contaminantes criterios (SEMARNAT, 2013).

Estos límites se definen a partir de la evidencia científica disponible y la capacidad de un estado para garantizar su cumplimiento. Su principal propósito es la protección de la salud de la población en general y particularmente de los grupos sensibles.

1.1 Problema

Cuando los problemas de contaminación de la ciudad se veían insuperables, para hacer cumplir las normas a largo plazo, comenzaron a implementarse y poner en práctica programas y medidas como: corredores de autobuses de cero emisiones como el Metrobús, que motivan a los conductores a dejar el coche en casa; Ecobici, un programa de préstamos de bicicletas; “Hoy No Circula”, un programa que restringe el uso de los coches un día entre semana, dependiendo de su número de placas.

Estas medidas mejoraron la calidad del aire en la ciudad, sin embargo, los indicadores continuaban mostrando valores por encima de los establecidos en las normas de calidad del aire.

1.2 Justificación del Trabajo

Dadas las características físicas geográficas de la ZMCM, las condiciones que en ella se presentan, no son las más adecuadas para la dispersión de contaminantes. De manera general, se entiende que factores meteorológicos como la dirección y velocidad del viento, así como fenómenos como las inversiones térmicas y la variabilidad de la altura de la capa de mezcla, son elementos de gran importancia en este sentido; y aunque los estudios realizados al respecto, revelan su relación con la concentración de contaminantes y nos proporcionan una idea de la influencia de estos elementos sobre la concentración de partículas en la escala local, no existen evaluaciones sobre impacto en la calidad del aire basadas en las emisiones y programas para reducir las mismas;

Por lo tanto, la importancia de la presente investigación se debe a que, aunque de manera general, se conoce la relación entre partículas suspendidas y variables/ fenómenos meteorológicos y mucho se ha investigado sobre este tema en la Ciudad de México, se podría estar subestimando dicha relación.

1.3 Hipótesis

La velocidad y dirección del viento juegan un papel determinante en el origen de eventos con altas concentraciones de partículas en la Ciudad de México.

Por lo tanto, la presente investigación tiene como:

1.4 Objetivo Principal

Evaluar el impacto en la calidad del aire a partir de la asociación entre partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$ y variables meteorológicas, usando técnicas estadísticas.

1.5 Objetivos Específicos

- Identificar los patrones de comportamiento en variación espacial y temporal de concentración de partículas suspendidas a partir de gráficas de líneas.
- Relacionar factores meteorológicos con concentración de partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$ calculando correlaciones.
- Describir la influencia de las variables meteorológicas que presenten mayor asociación con partículas suspendidas PM_{10} y $PM_{2.5}$ sobre la concentración de dicho contaminante comparando sus distribuciones espacial y temporal.
- Valorar el impacto en la calidad del aire por partículas suspendidas a partir del cálculo de su importancia.
- Proponer medidas de prevención para eventos de altas concentraciones de partículas suspendidas.

CAPITULO II. ANTECEDENTES

La contaminación del aire en la Ciudad de México debido al polvo de las tolvaneras y otras partículas suspendidas en el aire, es un fenómeno que viene afectando desde finales de la década de los 60 (Bravo et al, 1960). Sin embargo, el problema de la contaminación tal como hoy lo conocemos, se originó y ha aumentado con el crecimiento mismo de la ciudad, con el de su población, los empleos generados en la industria y los movimientos y traslados de sus habitantes. El principal factor que explica la emisión de contaminantes en la ciudad es el consumo de energía (IE, 2014). Por lo tanto, se necesita considerar la evolución económica de la ciudad, sus perspectivas y, al mismo tiempo, las relaciones entre bienestar y consumo energético. De acuerdo con (José Goldemberg, 1987) se puede afirmar que “la hipótesis según la cual la mejora del bienestar exige un fuerte crecimiento del consumo de energía no debe ser aceptada ciegamente”.

2.1 Programas de Calidad del Aire

La Ciudad de México ha estado altamente contaminada desde los años 80, década en que el ritmo de crecimiento de la contaminación atmosférica fue vertiginoso. En respuesta a tal situación se procedió a formular un Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (PICCA, 1990) que comprometiera a varios sectores de la industria a disminuir sus propias emisiones. Incluyó, además, áreas como *Reforestación y Restauración Ecológica* para llevar a cabo programas de reforestación urbana y su área de influencia ecológica; Así como al área de *Investigación, Educación Ecológica y Comunicación Social* para llevar a cabo programas de capacitación y formación profesional, ampliar y reforzar la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) y desarrollar el Estudio Global de la Calidad del Aire (EGCA). Dicho programa abarcaba el periodo de 1990 a 1994.

La primera crisis se logró controlar limitando significativamente la actividad industrial en la región. Se cerraron las industrias más contaminantes como las fundidoras y la Refinería 18 de Marzo y otras como la industria pesada fueron trasladadas fuera de la ciudad. A pesar de esto, siguen asentadas un gran número de industrias que además de aportar bienes, servicios y empleos a la ciudadanía, también son una

fueron una fuente importante de generación de contaminantes atmosféricos y de compuestos de efecto invernadero como CO₂, CH₄, N₂O y HFC (SEDEMA, 2016).

Aunque desde 1990 se inicia el suministro de gasolina sin plomo (SEMARNAT, 1990), en la Reunión Cumbre de las Américas realizada en diciembre de 1994, México convino realizar esfuerzos adicionales para reemplazar el uso de gasolina con plomo por gasolina sin plomo, situación que el país concluyó en 1997 (PCA, 1994).

La aplicación, en 1992, de las pruebas de emisiones para vehículos y la implementación de operativos como el “Hoy no circula” también contribuyeron en el control de las emisiones.

El Hoy No Circula fue concebido como una medida regulatoria para controlar la demanda de gasolinas y reducir las emisiones vehiculares. Fue presentado como un programa temporal buscando que la gente se desplazara en transporte público o compartiendo el auto con vecinos o compañeros de trabajo (Carmona, 2003).

Durante los primeros meses de aplicación los resultados fueron satisfactorios, sin embargo, en cuanto se decidió convertirlo en programa permanente los habitantes de la zona metropolitana se enfrentaron a un muy diferente esquema de incentivos que modificó radicalmente sus decisiones (INEGI, 1999).

La disponibilidad de los automovilistas para cambiar de modo de transporte ante la aplicación de esta medida regulatoria, es muy baja debido a su percepción del sistema de transporte público como un mal sustituto para el auto privado. La percepción de un servicio de mala calidad en los vehículos de transporte público, orientaron las decisiones de las familias hacia las opciones más costosas desde el punto de vista social y ambiental: aparte de la adquisición de autos de repuesto (generalmente más viejos y más contaminantes), recurrieron al traslado de sus recorridos a otros días de la semana incrementando con ello los kilómetros recorridos y por lo tanto el volumen de emisiones a la atmósfera (Carmona, 2003).

Otras de las medidas del Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica (PICCA, 1990) que se pueden citar son:

- Mejoramiento e incorporación de nuevas tecnologías en la industria y los servicios,
- Instalación inmediata de convertidores catalíticos en todos los vehículos a gasolina, modelo 1991.
- Reordenación y ampliación del Sistema de Transporte Eléctrico.
- Mejoramiento de vialidades, semaforización, estacionamientos y coordinación de modos de transporte.
- Autorización de rutas de autobuses para reducir el uso de vehículos privados y estimular el transporte institucional de escolares y empleados.
- Cambio de combustóleo por gas natural en industrias. Convenios con la industria para control de emisiones.
- Prohibición de nuevas industrias contaminantes.
- Realización de monitoreo continuo en las industrias más contaminantes.
- Mejoramiento de procesos de combustión e instalación de equipos de control en establecimientos de servicios.
- Instalación de monitores continuos de emisiones en las centrales termoeléctricas.
- Reforestación rural del Valle de México y su área ecológica de influencia.
- Ampliación y reforzamiento de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA).
- Desarrollo del "Estudio Global de la Calidad del Aire" (EGCA). Relación permanente con Universidades y Centros de Investigación.

El año 1995 marca la renovación de este programa con la instrumentación del *Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México*, cuyas estrategias, hasta el año 2000 fueron (PROAIRE, 1996):

- Mejoramiento e incorporación de nuevas tecnologías en la industria y los servicios,
- Mejoramiento e incorporación de nuevas tecnologías en vehículos automotores,
- Mejoramiento y sustitución de energéticos en la industria y los servicios,
- Mejoramiento y sustitución de energéticas automotrices,
- Oferta amplia de transporte público seguro y eficiente,

- Integración de políticas metropolitanas (desarrollo urbano, transporte y medio ambiente),
- Incentivos económicos,
- Inspección y vigilancia industrial y vehicular,
- Información y educación ambiental y participación social.

Para dar continuidad al programa PROAIRE, en febrero de 2002 la Comisión Ambiental Metropolitana (CAM) presentó el *Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010 (PROAIRE 2002-2010)*.

Durante su vigencia se convirtió en el eje de la gestión ambiental en torno al cual giraron las políticas y las líneas de acción para el control de la contaminación del aire.

Dentro de las acciones del programa se propusieron 38 medidas enfocadas a la reducción de emisiones generadas por el transporte, 16 medidas para la disminución de emisiones en industrias y servicios, 15 medidas para la preservación y restauración de los recursos naturales y el ordenamiento de la expansión urbana, 8 medidas para la disminución de la exposición a la contaminación, y 12 medidas para el fortalecimiento de la educación ambiental e institucional.

En este periodo se fortalecieron los marcos normativos en diversos sectores, se incentivó la participación de la comunidad científica en el entendimiento y solución de los problemas ambientales. Este programa contribuyó a la reducción de las concentraciones de partículas suspendidas.

En 1993 se establecieron numerosas Normas Oficiales Mexicanas entre las que figuran:

NOM-035-ECOL-1993, Establece los métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición.

NOM-025-SSA1-1993, Criterios para evaluar el valor límite permisible para la concentración de material particulado. Valor límite permisible para la concentración

de partículas suspendidas totales PST, partículas menores de 10 micrómetros PM_{10} y partículas menores de 2.5 micrómetros $PM_{2.5}$ de la calidad del aire ambiente. Criterios para evaluar la calidad del aire.

Esta última fue modificada el 20 de agosto de 2014 por la Secretaría de Salud y publicada en el Diario Oficial de la Federación:

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

La norma deroga el indicador para partículas suspendidas totales (PST) y actualiza los valores límite para PM_{10} y $PM_{2.5}$, así como el indicador estadístico empleado para su evaluación.

Desde 1992 se han elaborado Informes de la Calidad del Aire de la ZMCM. El primero, fue un compendio desde 1986-1992. A partir de éste, excepto en los años 1993 y 2012, se continuó con la realización de esta actividad.

A lo largo del período comprendido en cada uno de los informes se ha observado una disminución continua en la concentración de todos los contaminantes del aire, esto a pesar del crecimiento y desarrollo ininterrumpido de la Ciudad de México y su área metropolitana. Estas tendencias reflejan el éxito de las políticas para el control de la contaminación del aire implementadas de manera continua desde 1990. Sin embargo hubo períodos que se caracterizaron por ligeros incrementos en la concentración de partículas suspendidas, con pequeñas tasas de cambio, tal es el caso de los años 2008 y 2009 y 2011.

Por otra parte, en el 2014, aunque las concentraciones de la Zona Metropolitana no cumplen con la norma, cuando se desagrega la información por entidad federativa se observa que, en el Distrito Federal los niveles de PST y PM_{10} fueron menores a las recomendaciones de la NOM-025-SSA1-1993. Por primera vez en la historia de la ciudad, en el caso de PM_{10} se cumple con el estándar de la U.S. EPA, pero no con las recomendaciones de la OMS.

Entre 2008 y 2015 se activó, en 5 ocasiones, la fase de precontingencia por PM_{10} , los días 3 de noviembre de 2009, 11 de enero de 2011, 25 de diciembre de 2012, 1 de enero de 2013 y 25 de diciembre de 2015.

En 1989 se hizo un esfuerzo por elaborar un inventario de emisiones para la ZMCM, según el cual las fuentes industriales y de servicios participaban con sus emisiones en un 8.4% del total y los vehículos con un 77%.

En 1995 se elaboró otro, con información disponible hasta 1994, que desafortunadamente no puede ser comparado en términos absolutos con el inventario anterior por no aplicar los mismos supuestos y metodologías de cálculo.

Ya a partir de 1996 y hasta el año 2014, se ha estado elaborando, cada dos años, con el objetivo de identificar las fuentes generadoras de contaminantes, así como su aporte y localización, con la finalidad de ser una herramienta para la toma de decisiones en materia de calidad del aire y en la implementación y evaluación de medidas de reducción de contaminantes atmosféricos.

2.2 Estudios Realizados

En materia de investigación, existe suficiente evidencia científica para señalar que la exposición a contaminantes atmosféricos ocasiona daños a la salud de las personas, a la productividad sostenible de los ecosistemas y a la economía del país. Diversos estudios epidemiológicos han demostrado que el tiempo que los individuos están expuestos a contaminantes, aunado a sus patrones de conducta y a los microambientes en los que se desenvuelven, en el trabajo o en el hogar, constituyen factores que pueden provocar enfermedades y muertes prematuras. Estas afectaciones dependerán también de sus vulnerabilidades, tales como predisposición genética, edad, estado nutricional, o presencia de padecimientos cardíacos y respiratorios (SEMARNAT, 2016).

En 1996 la American Thoracic Society publicó una revisión y análisis de la literatura epidemiológica sobre los efectos adversos agudos de las partículas suspendidas, en la que se enumeraron varios efectos adversos asociados con la exposición a partículas menores a $10 \mu m$ (PM_{10}). La revisión también encontró que los adultos mayores o con enfermedades pulmonares o cardíacas preexistentes, son más

susceptibles que otros a los efectos adversos de las PM_{10} . Desde entonces, muchos estudios más recientes han proporcionado pruebas adicionales de que el exceso de mortalidad y morbilidad se asocian con la exposición a corto plazo a PM_{10} y $PM_{2.5}$ (Pope et al., 2006; US EPA, 2004; US EPA, 2009; Lu et al., 2015; Shah et al., 2015; Cai et al., 2016).

Brook et al. (2010) describe tres vías probables a través de las cuales las partículas ejercen sus efectos en la salud cardiovascular: pueden activar vías inflamatorias y causar estrés oxidativo sistémico, dando lugar a la producción de citoquinas proinflamatorias; pueden perturbar el sistema nervioso autónomo, lo que conduce a un aumento de la presión arterial, aumento del potencial arrítmico y disminución de la variabilidad de la frecuencia cardíaca. Las partículas más pequeñas ($\leq 1\mu m$), o alguno de sus componentes, por su tamaño pueden ingresar al torrente sanguíneo y causar una mayor constricción de los vasos sanguíneos, así como un aumento de la presión sanguínea. Cada una de estas vías también puede conducir a la formación de especies reactivas oxigenadas que podrían provocar la oxidación del ácido desoxirribonucleico (ADN) e inflamación sistémica. Algunos componentes prooxidantes, como los metales, pueden desencadenar una respuesta inflamatoria en las células (Eiguren- Fernández et al., 2015).

Un estudio del Centro Mario Molina señala que uno de los 15 primeros factores de riesgos a la salud en México es la exposición a concentraciones excesivas de contaminantes en el aire (CMM, 2015).

Otras investigaciones concluyen que la exposición prolongada a altas concentraciones de partículas finas, como $PM_{2.5}$ y PM_{10} , incrementan significativamente la mortalidad prematura por cáncer pulmonar (Schwartz, 2000) y puede desencadenar procesos neurodegenerativos en la infancia (Calderón, et al, 2015).

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) realizó un estudio comparativo para determinar cuántas muertes prematuras relacionadas con la exposición al contaminante $PM_{2.5}$ se evitarían en la Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara si se adoptaran los estándares recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), y cuántas si se observaran los que determinan las Normas Oficiales Mexicanas (NOM). El resultado fue el siguiente: Si las tres

ciudades se rigieran bajo los criterios de la OMS, dejarían de morir prematuramente 2 mil 170 personas; en cambio, si se consideraran los estándares de la NOM, se evitaría la muerte prematura de mil 317 personas. Es decir, la aplicación de los criterios recomendados por la OMS salvaría adicionalmente, a 853 personas de muertes prematuras en esas tres ciudades (INECC, 2014).

Otro estudio referido al mismo contaminante y realizado en distintas ciudades de México, da cuenta de que si se redujeran las concentraciones a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (microgramos por metro cúbico), se evitaría el 17 % de muertes prematuras asociadas a enfermedades cardiovasculares, el 18 % por enfermedades asociadas a isquemia del corazón, y el 12 % por enfermedades cardiopulmonares (CMM, 2015).

En otra investigación se concluye que si se redujeran las concentraciones de PM_{10} a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que es el valor recomendado por la OMS para proteger la salud de la población, las muertes prematuras disminuirían en un 15 % (OMS, 2016).

Según el estudio realizado en la ciudad de México (Vega et al, 2010), la principal contribución de $\text{PM}_{2.5}$ fue de las emisiones de fuentes móviles con 45%. Se realizaron simulaciones por computadora para un episodio de polvo arrastrado por el viento y los resultados coincidieron con las observaciones. Se encontró que las concentraciones de partículas estaban inversamente relacionadas con la velocidad del viento de transporte, y que la mayor dispersión de contaminantes se presentaba por la tarde, calculado con el índice de ventilación. Aparecieron en los patrones diurnos emisiones elevadas que se atribuyeron a las de vehículos de carbono elemental durante las horas de tráfico pesado, mientras que los picos posteriores de dispersión de luz se atribuyeron a aerosol secundario formado foto químicamente en la atmósfera.

Las concentraciones más altas de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} ocurrieron en Sector NE, donde las actividades industriales y de tráfico son prevalente, y disminuyó al SW. La composición química de $\text{PM}_{2.5}$ estaba dominada por carbono, sulfato, nitrato, amonio y especies de corteza. Tanto las concentraciones orgánico como de carbono elemental fueron más altas en el sector NE.

Los resultados mostraron una variación espacial significativa en las contribuciones fuente de $PM_{2.5}$ dependiendo de tipos de suelo y uso de la tierra. NET mostró la contribución más alta de polvo, más del 38%, mientras que en XAL, MER y CES las fuentes móviles contribuyeron con un promedio de 57%, y NET, PED y TLA con 33%.

El modelado de la dispersión de partículas mostró que los vientos con componente del norte transportan polvo de corteza y origen agrícola. El análisis de meteorología indicó que el viento en la superficie velocidad superior a 8 m / s y sistemas débiles de alta presión y bajo la altura de mezclado se asoció a altas concentraciones de PM_{10} y el último también a altas concentraciones de $PM_{2.5}$.

Investigaciones realizadas (Vega et al, 2011) mostraron que las concentraciones de masa total de $PM_{2.5}$ son similares a las reportadas previamente para la Ciudad de México (Vega et al., 2002; Vega et al., 2004) con las concentraciones más altas en el sitio industrial y las más bajas en el sitio residencial, sugiriendo que estos resultados representan condiciones para esta época del año. Las rosas de contaminación mostraron que el transporte del norte / noroeste a menudo se asocia con algunos de los elementos tóxicos, lo que sugiere un crecimiento descontrolado de las actividades industriales en el norte de la Ciudad de México.

Foi. B, et al, 2005, realizó algunos esfuerzos para describir los patrones de circulación del viento tanto dentro de la cuenca de la Ciudad de México como a escala regional. El estudio abarca la campaña MCMA-2003, realizada en la Ciudad de México. Se identificaron tres tipos de patrones de viento, sin embargo, solo cuentan para las condiciones meteorológicas que ocurren durante la campaña.

CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO

3.1 Partículas Suspendidas

Uno de los contaminantes más complejos por su composición, propiedades y origen, son las partículas. El término partículas suspendidas es un concepto genérico que hace referencia a cualquier material sólido o líquido que se encuentre en suspensión en el aire ambiente, con un amplio intervalo de tamaño (0.005 μm a 100 μm). Se generan por procesos mecánicos, físicos y químicos, en una gran variedad de fuentes antropogénicas y naturales. Pueden ser emitidas directamente a la atmósfera (partículas primarias) o producirse mediante reacciones químicas en la atmósfera (partículas secundarias).

La toxicidad de las partículas está determinada por sus propiedades físicas y químicas. El tamaño es un parámetro importante para caracterizar su comportamiento, ya que de él depende el tiempo de suspensión en el aire ambiente, y la capacidad de penetración en diversas regiones del sistema respiratorio y por ende, la dosis a la que puede estar expuesta la población.

La presencia de las partículas suspendidas en el aire ambiente, representa uno de los mayores riesgos para la salud. Se ha analizado en estudios epidemiológicos la asociación entre la concentración de partículas suspendidas y los daños a la salud humana. No se conocen con precisión los mecanismos del daño en el organismo, por lo que se hacen esfuerzos importantes para estudiar el papel de la composición química y biológica, así como sus mecanismos fisiopatológicos.

Pueden agravar el asma, reducir la función pulmonar, incrementar el riesgo de bronquitis y otras enfermedades respiratorias y cardiovasculares. La exposición a altas concentraciones de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, se asocia con el incremento en el riesgo de morbilidad y mortalidad en todos los grupos de la población.

En el monitoreo de la calidad del aire se utilizan dos indicadores para el monitoreo de las partículas suspendidas: las partículas menores a 10 μm (PM_{10}) y las partículas menores a 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$). Los efectos en la salud provocados por las partículas se presentan en todos los grupos de edad, sin embargo, existen grupos que tienen una mayor sensibilidad a este contaminante como los niños, adultos mayores y personas con problemas respiratorios y cardiovasculares.

3.1.1 Partículas Suspendidas Totales (PST)

México es uno de los pocos países que aún mantiene un estándar vigente para partículas suspendidas totales, que en términos operativos son partículas con tamaños menores a aproximadamente 100 μm . Se sabe que las partículas con diámetros mayores a 10 micrómetros permanecen poco tiempo en suspensión, por lo que las fracciones PM_{10} o $\text{PM}_{2.5}$ son un mejor indicador para evaluar los riesgos a la salud.

En cuanto a sus efectos sobre la salud, las partículas grandes ($>10 \mu\text{m}$) se sedimentan fácilmente y, si logran ingresar al sistema respiratorio, suelen alojarse en la región superior, para después eliminarse por el mecanismo de limpieza natural del tracto respiratorio. Si bien no tienen un impacto significativo en la salud, la exposición continua a altas concentraciones puede provocar irritación de garganta y mucosas.

3.1.2 Partículas Menores a 10 Micrómetros (PM_{10})

Esta fracción representa a aquellas partículas que pueden pasar la laringe y penetrar a las regiones torácicas bajas del sistema respiratorio. En la Ciudad de México éste contaminante es regulado con la siguiente Norma Oficial Mexicana publicada el 23 de diciembre de 1994 (Tabla 3.1)

Tabla 3.1 Norma Oficial Mexicana de Salud Ambiental.

NOM-025-SSAI-1992	
120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Percentil 98 promedio 24 h	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Promedio anual

Los sectores que ofrecen el mayor potencial de reducción de PM_{10} , son las vialidades pavimentadas y sin pavimentar, las cuales se generan debido a la re-suspensión de polvo durante el paso vehicular sobre las vialidades. Tan solo estas dos categorías aportan el 50% (17,638 toneladas) de las emisiones totales generadas de este contaminante en la ZMCM (SEDEMA, 2013).

El proceso de generación de partículas de la categoría de vialidades pavimentadas, inicia con la acumulación de residuos o polvo sobre la vialidad, que posteriormente

son finamente triturados y suspendidos por los vehículos que las recorren, por lo que las emisiones dependerán en gran medida de la acumulación del material y de la intensidad del flujo vehicular. En lo que respecta a las vialidades no pavimentadas, además de las dos variables anteriores, también influye la humedad y tipo de suelo (SEDEMA, 2013).

Otras categorías de importancia de la emisión de partículas son: la fabricación de productos a base de minerales no metálicos y las actividades agrícolas por el movimiento de tierra durante la labranza; en conjunto estas dos actividades aportan el 14% de la emisión total de PM_{10} (SEDEMA, 2012).

Cuando las partículas son menores a 10 micrómetros (PM_{10}) pueden ingresar al sistema respiratorio y alcanzar diferentes regiones, el tamaño determina la zona en donde se depositan. Las partículas con tamaños entre 10 y 2.5 micrómetros se depositan en la nariz, garganta, tráquea y la región superior de los bronquios.

3.1.3 Partículas Menores a 2.5 Micrómetros ($PM_{2.5}$)

Se conocen también como partículas finas y provienen principalmente de la transformación de los gases emitidos por fuentes contaminantes. En el sistema respiratorio pueden alcanzar las regiones más profundas, por lo que en la Ciudad de México son reguladas con la siguiente Norma Oficial Mexicana (Tabla 3.2):

Tabla 3.2 Norma Oficial Mexicana de Salud Ambiental.

NOM-025-SSAI-1992	
65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Percentil 98 promedio 24 h	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Promedio anual

Es relevante mencionar que en el caso de las $PM_{2.5}$ hay una importante contribución de las partículas secundarias que se forman en la atmósfera a través de procesos fotoquímicos, y también pueden transportarse desde otras ciudades o fuentes industriales remotas.

Después del ozono, la fracción de partículas $PM_{2.5}$ es el contaminante que tiene una mayor contribución al deterioro de la calidad del aire y desde el inicio de su monitoreo en 2003, ha reportado concentraciones que superan los límites establecidos por la NOM. Si bien, el indicador de la NOM para el promedio de 24

horas no se ha excedido en ninguna ocasión, el indicador anual de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se ha superado de manera consistente en prácticamente todas las estaciones que miden el contaminante.

Con relación a las emisiones de $\text{PM}_{2.5}$, las vialidades pavimentadas y sin pavimentar siguen siendo la principal fuente de generación de este contaminante, sobre todo las vialidades pavimentadas que aportan el 18% del total de la ZMCM. Las siguientes categorías de importancia por su emisión son los procesos de combustión, en particular el uso del diesel en los tractocamiones y el gas licuado de petróleo utilizado en el sector habitacional, que contribuyen el 15% y 9% respectivamente. En conjunto, las cuatro categorías mencionadas anteriormente participan con el 53% del total de este contaminante en la ZMCM (SEDEMA, 2012).

Las partículas menores a 2.5 micrómetros ($\text{PM}_{2.5}$) pueden alcanzar mayor profundidad en el tracto respiratorio, hasta los bronquiolos y alveolos. Las partículas menores a un micrómetro alcanzan la región alveolar, que es la zona en donde se realiza el intercambio de oxígeno. Los daños en la salud están directamente asociados con el tamaño y la concentración, sin embargo, estudios recientes han encontrado relaciones con la composición y el número.

3.2 Métodos de Medición

Las NOM técnicas definen los métodos de medición recomendados para el monitoreo de los contaminantes criterio. Estos métodos de medición pueden ser de referencia o equivalentes. Generalmente los métodos de medición propuestos por la NOM tienen una correspondencia con los designados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés), por lo que cuando no existe una NOM para un contaminante criterio se utiliza la recomendación de la US EPA.

Para Ambas fracciones no se cuenta con una NOM de métodos de medición, sin embargo, se considera el método de referencia que recomienda la US EPA. Los monitores de partículas que se usan para monitorear partículas suspendidas en aire ambiente, de diámetros menores a 10 y 2.5 micrómetros, lo hacen en tiempo real. Determinan la concentración de partículas aprovechando las propiedades físicas de las mismas.

Los principios de operación comúnmente utilizados son: el de Microbalanza de Elemento Oscilante y el de Atenuación de Radiación Beta. El tamaño de partículas a monitorear depende de los fraccionadores de cada equipo, que son colocados en la entrada de muestra. Éstos aprovechan la dinámica de las partículas para que a cierta velocidad de flujo, las partículas de mayor tamaño sean impactadas en algún sistema de retención y no lleguen hasta el filtro.

3.2.1 Microbalanza de elemento oscilante.

El muestreador TEOM (por sus siglas en inglés, Tapered-Element Oscillating Microbalance) mide la cantidad de masa recolectada de una muestra de aire a una velocidad casi continua. Las partículas se recolectan en un filtro colocado en el extremo de un elemento puntiagudo oscilante, que tiene su otro extremo fijo. La frecuencia de oscilación del elemento cambia en proporción directa a la masa a medida que esta se acumula en el filtro. La cantidad de masa en la muestra recolectada se calcula a partir del cambio en la frecuencia del elemento en un período de tiempo fijo. El control de la tasa de flujo se hace mediante dos controladores de flujo másico: uno para el flujo de la muestra, desde uno a tres litros estándar por minuto y el otro para un flujo auxiliar para cumplir con las especificaciones de diseño de la entrada de muestra (16.7 l/min). La concentración de partículas se determina a partir de la masa recolectada, la tasa de flujo de la muestra y el tiempo de recolección de muestra. Ésta se expresa como concentración a las condiciones estándar de 25°C y 760 mmHg. La tecnología de microbalanza de elemento oscilante permite hacer determinaciones de masa muy precisas, con mayor resolución que las microbalanzas convencionales.

3.2.2 Atenuación de radiación beta.

En este tipo de equipos el aire ambiente se introduce al sistema mediante una bomba de succión, depositando las partículas en el filtro (una cinta carrete de fibra de vidrio) de manera intermitente esto es, que el impacto de la masa de partículas en el medio filtrante se realiza en periodos de tiempo previamente establecidos por el usuario y que pueden ir desde una hasta veinticuatro horas o inclusive cuando el filtro se sature. Se hace pasar radiación beta de bajo nivel a través de la cinta y las partículas depositadas. La capa de partículas, que va en aumento, reduce la intensidad del haz de radiación beta en la sección, la cual es medida por una

cámara de ionización como detector. La señal eléctrica de salida es proporcional a la masa real muestreada. La concentración se calcula a partir del aumento temporal de la masa de partículas. Algunos de estos monitores usan ciclos de medición, en los cuales el filtro con la muestra se transporta automáticamente para ser medida. Cada ciclo comienza cuando se coloca una sección limpia de cinta en la posición de muestreo. Otros son capaces de medir la masa y la concentración de las partículas en el filtro de manera continua, ya que la recolección y la medición se hacen simultáneamente en el mismo segmento del filtro.

3.3 Contaminantes Atmosféricos

La poca visibilidad de lugares lejanos como parte del paisaje es un indicador del deterioro de la calidad del aire. Si vivimos en una ciudad es común identificar la contaminación del aire y asociarla a la actividad industrial, comercial y al uso de vehículos, características propias de una urbe. Sin embargo la contaminación del aire no sólo tiene su origen en la industria, en los hogares o por el uso de los vehículos. Los fenómenos naturales que se producen en la superficie o en el interior de la Tierra –como el caso de las erupciones volcánicas, que produce emisiones de gases, vapores, polvos y aerosoles–, también contribuyen a la contaminación del aire. Por esta razón los contaminantes del aire se pueden clasificar según su origen como naturales y antropogénicos. Los primeros provienen de fuentes naturales y los segundos son aquellos derivados de las actividades del hombre (SEMARNAT, 2013).

Es de gran importancia analizar las características, propiedades y origen de los contaminantes más importantes en función de su fuente de origen, ya que éste es el criterio más habitual. En la atmósfera se encuentran una serie de compuestos que contribuyen a la contaminación del aire, de los cuales se pueden diferenciar dos grupos principales:

Contaminantes primarios:

Son aquellos que se vierten directamente a la atmósfera por alguna fuente de emisión como chimeneas, automóviles, entre otros. Los contaminantes atmosféricos que integran este grupo son: Óxidos de azufre (SO_x), Monóxido de carbono (CO), Óxidos de nitrógeno (NO_x), Hidrocarburos (HC) y Partículas.

Las partículas están constituidas por el material respirable presente en la atmósfera en forma sólida o líquida (polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento y polen, entre otras). De acuerdo con su tamaño se pueden dividir en dos grupos principales: las de diámetro aerodinámico igual o inferior a los 10 μm (PM_{10}) y las de fracción respirable más pequeña ($\text{PM}_{2,5}$).

Contaminantes secundarios: Son los contaminantes originados en el aire como consecuencia de la transformación y reacciones químicas que sufren los contaminantes primarios en la atmósfera. Se pueden considerar: *Ozono (O_3)*, *Lluvia ácida* y la *contaminación fotoquímica*.

3.4 Fuentes de emisión

La contaminación del aire proviene de una mezcla de miles de fuentes de emisión que van desde chimeneas industriales y vehículos automotores hasta el uso de productos de limpieza y pinturas domésticos. Incluso la vida animal y vegetal puede desempeñar un papel importante en la contaminación del aire. En general, para los propósitos de un inventario de emisiones, las fuentes de emisión se agrupan en cuatro categorías principales (INE-SEMARNAT, 2005):

- Fuentes puntuales o fijas
- Fuentes de área
- Fuentes móviles (de vehículos automotores)
- Fuentes naturales

3.4.1 Fuentes Puntuales o fijas

En México, las fuentes puntuales o fijas están definidas en el *Artículo 6 del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera*, como toda instalación establecida en un solo lugar, que tenga como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales, comerciales, de servicios o que generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera. Como se indica en el Artículo 111 Bis de la Ley y en el Artículo 11 del Reglamento mencionado, las fuentes puntuales bajo jurisdicción federal incluyen:

- Los siguientes sectores industriales: químico, petrolero y petroquímico; pinturas y tintas; automotriz; celulosa y papel; acero y hierro; vidrio; generación de energía eléctrica; asbestos; cemento y cal; así como tratamiento de aguas residuales.
- Todos los establecimientos, proyectos o actividades (industrial, comercial o de servicios) administrados por entidades públicas Federales.
- Fuentes que afecten el equilibrio ecológico de un estado o país adyacente.

Estos establecimientos deben solicitar una licencia de operación, actualmente denominada Licencia Ambiental Única (LAU), a través de la SEMARNAT.

De igual forma, anualmente deben presentar la estimación de emisiones anuales de contaminantes a través de la Cédula de Operación Anual (COA) y realizar las mediciones en chimenea requeridas por la normatividad correspondiente.

3.4.2 Fuentes de Área

Las fuentes de área representan aquellas que son demasiado numerosas y dispersas como para incluirse de manera eficiente en un inventario de fuentes puntuales. Colectivamente, sin embargo, las fuentes de área representan un porcentaje significativo de las emisiones de contaminantes, por lo que deben siempre incluirse en un inventario de emisiones para asegurar que éste se encuentre completo. En los inventarios de fuentes de área, los datos de las emisiones se agrupan en grupos de fuentes similares o categorías. Un inventario de fuentes de área generalmente consiste de las siguientes grandes categorías:

- Combustión en fuentes fijas;
- Fuentes semiestacionarias;
- Uso de solventes;
- Almacenamiento y transporte de derivados de petróleo;
- Fuentes industriales y comerciales ligeras;
- Fuentes agrícolas;
- Manejo de residuos;
- Fuentes de área misceláneas.

3.4.3 Fuentes Móviles (Vehículos Automotores)

Las fuentes móviles de emisión están constituidas por los vehículos automotores que incluyen automóviles, camiones y autobuses diseñados para circular en la vía

pública. En la mayoría de las áreas urbanas, los vehículos automotores son los principales generadores de las emisiones de carbono orgánico total (COT), CO, NO_x, SO_x, PM, contaminantes tóxicos del aire y contaminantes que reducen la visibilidad. Debido a la magnitud de sus emisiones y a las consideraciones especiales requeridas para estimar su volumen, los vehículos automotores se manejan separadamente de otras fuentes de área. Las emisiones de vehículos automotores están integradas por diversos contaminantes que se generan por diferentes procesos. Los más comúnmente considerados son las emisiones del escape, que resultan del uso del combustible y que son emitidos a través del escape del vehículo, y una variedad de procesos evaporativos, los cuales resultan en emisiones de COT y que incluyen emisiones húmedas calientes.

Además de las actividades humanas, los fenómenos naturales y la vida animal y vegetal pueden jugar un papel importante en el problema de la contaminación del aire. Es primordial comprender la contribución general de este tipo de fuentes, especialmente en las áreas en las que las emisiones de fuentes naturales pueden ser significativas para el inventario.

3.4.4 Fuentes Naturales

A continuación, se describen dos fuentes naturales significativas que son comúnmente se consideran en los inventarios de emisiones atmosféricas (Semarnat, 2010).

Emisiones Biogénicas: Un gran número de investigadores han establecido que la vegetación (p.ej., pastos, cultivos, arbustos, bosques, etc.), emiten cantidades significativas de hidrocarburos a la atmósfera. Diversos estudios (e. g., Pierce et al., 1990; Robinson y Robbins, 1968) han demostrado incluso que, en ciertas áreas, las emisiones biogénicas de hidrocarburos no metano – HCNM- se pueden comparar o ser superiores a las emisiones de las fuentes antropogénicas.

La erosión eólica: este es otro fenómeno natural que genera emisiones. Sin embargo, debido a que dichas emisiones típicamente están asociadas con suelos perturbados, frecuentemente son tratadas como fuentes de área. Otras categorías más pequeñas de fuentes naturales incluyen a las termitas (emisiones de CH₄), los

relámpagos (emisiones de NO_x), los volcanes y la actividad geotérmica (emisiones de SO_x).

3.5 Dispersión de los contaminantes

La dispersión de contaminantes es un conjunto de procesos que tiene lugar en la atmósfera y cuyo resultado es la disminución de la concentración respecto a la que existía en el momento de la emisión. Así se habla de:

- Niveles de emisión: Concentración del contaminante en el foco donde se produce (fuente).
- Niveles de inmisión: Concentración del contaminante en otro lugar.

En la dispersión de los contaminantes influyen fundamentalmente dos tipos de parámetros, los de la fuente y los meteorológicos. En cuanto a los parámetros de la fuente, además de la cantidad de contaminante emitido, es preciso tener en cuenta factores como la altura de la fuente. Cuanto mayor sea la altura de esta menor serán las concentraciones superficiales. También hay que considerar el volumen total de gases emitido por la fuente y su temperatura. Si la temperatura es superior a la del aire exterior, los gases estarán sometidos a flotación térmica. La velocidad de liberación que depende del diámetro interno de la fuente y del volumen total de gases emitido produce fuerzas ascensionales dinámicas.

Entre los factores meteorológicos más importantes que influyen en la dispersión de los contaminantes son la velocidad y la dirección del viento local, así como la estratificación térmica vertical.

3.5.1 Influencia del viento en la dispersión de los contaminantes en la atmósfera.

Como los demás tipos de vientos, los vientos locales representan un desplazamiento del aire desde zonas de baja presión a zonas de alta presión, determinando los vientos dominantes de un área más o menos amplia. Por lo general, una mayor velocidad del viento reducirá las concentraciones de contaminantes al nivel del suelo, produciéndose una mayor dilución y mezcla ya que este, produce su dispersión horizontal y determina la zona expuesta. Sin embargo, su establecimiento está condicionado por rasgos orográficos que provocan el

calentamiento diferencial de las masas de aire, dando lugar a circulaciones cerradas, en las que los contaminantes lanzados a la atmósfera se incorporan a la circulación del viento y ocasionalmente se produce un aumento y acumulación progresiva de contaminantes en lugares o zonas barridas por esta variable (Lutgens, F.K et al, 2010).

Entre estos tipos de vientos destacan las brisas marinas y terrestres, así como los vientos de valle.

Tal es el caso de la ZMCM que se encuentra rodeada de una importante cadena montañosa por lo cual, las fronteras se encuentran bajo el régimen de vientos de Valle que presentan una variación diurna.

Durante el día, el aire que está comprimido lateralmente tiende a expandirse en sentido vertical y a fluir siguiendo la dirección ascendente del eje del valle. Simultáneamente soplan vientos anabáticos (ascendentes), que se forman como resultado del mayor calentamiento de las laderas del valle en comparación con su fondo. Estos vientos de pendiente se elevan por encima de la cumbre de las montañas y alimentan una corriente que retorna a lo largo de la línea del valle en sentido descendente (Viento catabático), que compensa el viento de valle. Las velocidades máximas se alcanzan aproximadamente a las 14:00 horas (Lutgens, F.K et al, 2010).

Durante la noche, se produce el proceso inverso: el aire frío y más denso de los niveles superiores se hunde en las depresiones y valles, produciendo lo que se conoce como viento catabático. Este viento alcanza su velocidad máxima justo antes de la salida del sol, momento en que es mayor el enfriamiento diario. Al igual que ocurre con el viento del valle, por encima del viento de montaña fluye una corriente de retorno, en este caso ascendente (Lutgens, F.K et al, 2010)

3.5.2 Influencia de la Altura de la Capa de Mezcla en la dispersión de los contaminantes.

Por otra parte, el perfil normal de temperaturas en la troposfera corresponde a un descenso a medida que aumenta la altura, debido al calentamiento de la superficie terrestre por radiación solar. Cuando esto ocurre se originan movimientos

convectivos dando lugar a una capa de mezcla superficial en la que se produce la homogeneización de las propiedades atmosféricas. Su altura va a limitar la dispersión de los contaminantes ya que mientras más alta sea, mayor será la dispersión y viceversa (INECC, 2016).

3.5.3 Influencia de la Inversión Térmica en la dispersión de los contaminantes

La inversión térmica, por el contrario, genera la concentración de los contaminantes. Este fenómeno puede producirse en noches largas, sin nubes ni viento. Consiste en una inversión del gradiente de temperaturas, que provoca que masas de aire frío queden atrapadas en zonas próximas a la superficie terrestre, y con ellas los contaminantes, por lo cual se observan concentraciones máximas a ras del suelo (García et al, 2012).

3.6 Impacto Ambiental

Se define como cualquier alteración al medio ambiente, en uno o más de sus componentes, provocada por una acción humana "(Moreira, 1992);

"Alteración de la calidad ambiental que resulta de la modificación de los procesos naturales o sociales provocada por la acción humana" (Sánchez, 1999);

"El cambio en un parámetro ambiental, en un determinado período y en una determinada área, que resulta de una actividad dada, comparado con la situación que ocurriría si esa actividad no hubiera sido iniciada" (Wathern, 1988).

La definición propuesta por Wathern, tiene la característica interesante de introducir la dimensión dinámica de los procesos del medio ambiente como base para comprensión de las alteraciones ambientales. Existen diversos tipos de impactos ambientales, pero fundamentalmente se pueden clasificar de acuerdo a su origen:

- Impacto ambiental provocado por el aprovechamiento de recursos naturales ya sean renovables, tales como el aprovechamiento forestal o la pesca; o no renovables, tales como la extracción del petróleo o del carbón.

- Impacto ambiental provocado por la ocupación del territorio. Los proyectos que al ocupar un territorio modifican las condiciones naturales por acciones tales como tala rasa, compactación del suelo y otras.
- Impacto ambiental provocado por la contaminación. Todos los proyectos que producen algún residuo (peligroso o no), emiten gases a la atmósfera o vierten líquidos al ambiente.

3.6.1 Metodologías de Evaluación del Impacto Ambiental

Se han desarrollado y utilizado en el proceso de evaluación del impacto ambiental (EIA). Sin embargo, ningún tipo de método por sí sólo, se puede utilizar para satisfacer la variedad y tipo de actividades que interviene en un estudio de impacto, por lo tanto, el tema clave está en seleccionar adecuadamente los métodos más apropiados para las necesidades específicas de cada estudio de impacto.

Los métodos más usados tienden a ser los más sencillos. Pueden no tener aplicabilidad uniforme en todos los países debido a diferencias en su legislación, marco de procedimientos, datos de referencia, estándares ambientales y programas de administración ambiental. Las metodologías deben seleccionarse a partir de una valoración apropiada producto de la experiencia profesional y con la aplicación continuada de juicio crítico sobre los insumos de datos y el análisis e interpretación de resultados.

Canter y Sadler (1997), clasificaron las metodologías para la evaluación de impacto ambiental en veintidós grupos de los cuales, se seleccionaron tres. La selección de la metodología a emplear, depende de varios factores, entre los cuales se destacan, la disponibilidad de los recursos técnicos, financieros, tiempo, datos e informaciones, las disposiciones legales, las especificaciones de los términos de referencia para la EIA y la preferencia del equipo técnico evaluador. La utilización de un método no es suficiente para lograr identificar y predecir todos los impactos que pueden ocurrir, por lo que, se hace necesario la integración de metodologías acordes la situación en particular. De acuerdo con el tipo de estudio a realizar en el presente trabajo y a la disponibilidad de información, las metodologías que más se adecuan se muestran a continuación.

3.6.1.1 Índices o indicadores

Se refiere a características específicas o integradas de factores ambientales o recursos. Se utilizan dentro de los estudios de impacto para representar parámetros de amplitud de medios o recursos. Específicamente, los índices se refieren a información numérica o bien información catalogada. Se usa como sistema auxiliar para describir los ambientes afectados, así como para la predicción y evaluación de impactos. Los índices numéricos o descriptivos se han desarrollado como una medida de la vulnerabilidad del medio ambiente y los recursos a la contaminación u otras acciones humanas y han probado su utilidad en la comparación de localizaciones para una actividad propuesta. Sobre estas bases, se pueden formular las medidas para minimizar los impactos ambientales e incluir controles.

3.6.1.2 Revisión bibliográfica

Supone ensamblar información sobre los tipos de proyectos y su impacto típico. Como se notará, por analogías, este tipo de información puede ser muy útil para la pronta definición de impactos potenciales. Puede también utilizarse para cuantificar anticipadamente, cambios específicos e identificar las medidas de mitigación para minimizar efectos indeseables. Actualmente está disponible una abundante información sobre impactos típicos de algunos proyectos.

3.6.1.3 Modelización cualitativa

Se refiere a un grupo de métodos en el que, se utiliza información descriptiva para relacionar varias acciones con cambios resultantes en los componentes ambientales. Como tal, se puede considerar como una extensión de categorías de las redes de trabajo que relacionan cada acción con los factores afectados y estos entre si. El enfoque general del modelaje cualitativo está en la comprensión de las interrelaciones fundamentales de los aumentos o disminuciones en ciertos rasgos ambientales como resultado de acciones particulares. En muchos casos, el modelaje cualitativo representa el único tipo de método disponible para la predicción de impactos. Nótese que está típicamente basado en opiniones de expertos.

3.6.2 Valoración de impactos ambientales

La metodología a seguir se basa por tanto en dos pilares, el conocimiento del proyecto para obtener las acciones y el estudio del entorno para obtener los factores.

En todos los casos la evaluación termina con un juicio sobre los efectos, clasificándolos en efectos notables o impactos y en efectos mínimos, y los impactos notables se clasifican a su vez en compatibles, moderados, severos y críticos. Si la única evaluación que se formaliza sobre un determinado efecto es esta categorización de los impactos dentro de dicha clasificación, a juicio del técnico, debidamente razonada, se dice que se ha realizado un simple enjuiciamiento.

Si se utiliza alguna técnica que permita mejorar la objetividad del juicio de valor realizado, se dice que se está ante una valoración, que puede ser cualitativa o cuantitativa. En una valoración cualitativa se evalúan una serie de cualidades de los impactos ambientales, utilizando normalmente las definidas por la legislación y obteniendo un valor numérico que se denomina importancia.

3.6.2.1 Valoración cualitativa de impactos ambientales o cálculo de la importancia.

Toda valoración, por definición, es subjetiva, lo cual no significa que tenga que ser arbitraria. Las distintas técnicas de valoración de impactos intentan disminuir la subjetividad de las conclusiones justificando de la mejor manera posible todos los juicios de valor que se realizan. En las técnicas de valoración cualitativa se valoran de forma subjetiva, aunque el resultado obtenido sea numérico, una serie de cualidades de los impactos de cada una de las alternativas, asignando valores prefijados según esa cualidad sea alta, media o baja. Los valores obtenidos pueden reflejarse en una matriz de cruce entre acciones y factores, que algunos autores denominan matriz de importancia y otros, índices de incidencia. La razón para llamar así a esta valoración cualitativa es que refleja, de alguna manera la importancia (Im) del impacto, midiendo la trascendencia de la acción sobre el factor alterado, mediante determinados atributos.

Para realizar un análisis cualitativo se tienen en cuenta las características del Anexo I del Real Decreto 1131/1988, de 30 de septiembre, por lo que se incluyen citas del mismo:

La primera es el signo, que puede ser positivo o negativo, según sea el efecto beneficioso o perjudicial:

Efecto positivo.

Aquél admitido como tal, tanto por la comunidad técnica y científica como por la población en general, en el contexto de un análisis completo de los costes y beneficios genéricos y de las externalidades de la actuación contemplada.

Efecto negativo.

Aquél que se traduce en pérdida de valor naturalístico, estético-cultural, paisajístico, de productividad ecológica, o en aumento de los perjuicios derivados de la contaminación, de la erosión o colmatación y demás riesgos ambientales en discordancia con la estructura ecológica- geográfica, el carácter y la personalidad de una localidad determinada.

Según la relación causa-efecto:

Efecto directo.

Aquél que tiene una incidencia inmediata en algún aspecto ambiental.

Efecto indirecto o secundario.

Aquél que no supone una incidencia inmediata respecto a la interdependencia, o, en general, respecto a la relación de un sector ambiental con otro.

La acumulación (A) se distingue entre efectos simples, acumulativos o sinérgicos según la forma de interaccionar con otros efectos:

Efecto simple.

Aquél que se manifiesta sobre un solo componente ambiental o cuyo modo de acción es individualizado, sin consecuencias en la inducción de nuevos efectos, ni en la de su acumulación, ni en la de su sinergia.

Efecto acumulativo.

Aquél que al prolongarse en el tiempo la acción del agente inductor, incrementa progresivamente su gravedad, al carecerse de mecanismos de eliminación con efectividad temporal similar a la del incremento del agente causante del daño.

Efecto sinérgico.

Aquél que se produce cuando el efecto conjunto de la presencia simultánea de varios agentes supone una incidencia ambiental mayor que el efecto suma de las incidencias individuales contempladas aisladamente. Asimismo, se incluye en este tipo aquel efecto cuyo modo de acción induce en el tiempo la aparición de otros nuevos.

Intensidad (In)

Por la intensidad o grado de destrucción del factor ambiental se clasifican los impactos en total, si la destrucción del factor es completa, notable si es elevada, media y mínima si es muy pequeña.

Características espaciales del impacto (EX)

Si la medida del impacto se realiza por la extensión de la superficie afectada se dice que puede ser puntual, local, parcial o extensivo y considerar incluso si la ubicación es crítica

Momento (MO)

Se considera el momento en el que se produce el efecto respecto a la acción. Es decir, su incidencia en el tiempo:

Efecto a corto, medio y largo plazo: Aquél cuya incidencia puede manifestarse, respectivamente, dentro del tiempo comprendido en un ciclo anual, antes de cinco años, o en períodos superiores.

La persistencia (P) indica el tiempo que permanece el efecto desde su aparición:

Efecto permanente.

Aquél que supone una alteración indefinida en el tiempo de factores ambientales predominantes en la estructura o en la función de los sistemas de relaciones ecológicas o ambientales presentes en el lugar.

Efecto temporal.

Aquél que supone alteración no permanente en el tiempo, con un plazo temporal de manifestación que puede estimarse o desestimarse. Un efecto temporal va a ser

siempre reversible y recuperable. Los efectos permanentes pueden ser reversibles o irreversibles, y recuperables o irrecuperables

Reversibilidad (Rv)

La definición del concepto de reversibilidad habla de procesos naturales y de medio plazo. Es decir, que de forma natural, al cesar la acción, el medio sea capaz de eliminar el efecto antes de cinco años:

Efecto reversible.

Aquél en el que la alteración que supone puede ser asimilada por el entorno de forma medible, a medio plazo, debido al funcionamiento de los procesos naturales de la sucesión ecológica y de los mecanismos de autodepuración del medio.

Efecto irreversible.

Aquél que supone la imposibilidad, o la “dificultad extrema”, de retornar, por medios naturales, a la situación anterior a la acción que lo produce.

Recuperabilidad (Rc)

Efecto recuperable.

Aquél en que la alteración que supone puede eliminarse, bien por la acción natural, bien por la acción humana, y, asimismo, aquel en que la alteración que supone puede ser reemplazable.

Efecto irrecuperable.

Aquél en que la alteración o pérdida que supone es imposible de reparar o restaurar, tanto por la acción natural como por la humana.

Los efectos también pueden producirse de una forma cíclica, por ejemplo, siempre a la misma hora, de forma irregular o impredecible o ser un efecto constante:

Efecto periódico.

Aquél que se manifiesta con un modo de acción intermitente y continúa con el tiempo.

Efecto de aparición irregular.

Aquél que se manifiesta de forma imprevisible en el tiempo y cuyas alteraciones es preciso evaluar en función de una probabilidad de ocurrencia, sobre todo en aquellas circunstancias no periódicas ni continuas, pero de gravedad excepcional.

Efecto continuo.

Aquél que se manifiesta con una alteración constante en el tiempo, acumulada o no.

Efecto discontinuo.

Aquél que se manifiesta a través de alteraciones irregulares o intermitentes en su permanencia.

3.6.2.2 Fórmula para la Valoración cualitativa simple

Para realizar la valoración cualitativa se elige una forma, quizás la más sencilla posible, con fórmulas también muy simples. Las cualidades seleccionadas de la legislación están reflejadas en la Tabla 3.1, en la que a cada atributo se le asignan los valores indicados. La fórmula de cálculo propuesta es:

$$Im = \pm (A + E + In + P + Rv + Rc).$$

Calculada la importancia mediante esta fórmula, o por otras similares, con solo el resultado obtenido no es posible analizar si este es bajo o elevado. Para contrastar los resultados de las distintas alternativas y para comparar con los obtenidos con otros impactos, usualmente se normaliza la fórmula. Se pueden usar distintas expresiones de normalización, según se pretenda que el resultado sea un número comprendido entre 0 y 1, o sea un valor comprendido entre otros valores a y b. Para obtener valores entre 0 y 1 se usa:

$$\text{Fórmula normalizada 1: } I_{NI} = \pm (|Im| - \text{Mínimo}) / (\text{Máximo} - \text{Mínimo})$$

Donde Mínimo es el mínimo valor, en valor absoluto, que se pueda alcanzar con la fórmula y Máximo es también el máximo valor en valor absoluto.

Tabla 3.3 Valores asignados a las características de cada impacto en una valoración cualitativa simple.

VALORACIÓN CUALITATIVA			
SIGNO		ACUMULACIÓN (A)	
Impacto beneficioso	+	Simple	1
Impacto perjudicial	-	Acumulativo	3
		Sinérgico	5
EXTENSIÓN (E)		INTENSIDAD (In)	
Área de influencia		Grado de destrucción	
Puntual	1	Baja	1
Parcial	2	Media	4
Extenso	3	Alta	8
PERSISTENCIA (P)		REVERSIBILIDAD (Rv)	
Permanencia del efecto		Medios naturales	
Temporal	1	Reversible	1
Permanente	3	Irreversible	3
RECUPERABILIDAD (Rc)			
Medios humanos			
Recuperable	1		
Irrecuperable	3		

El signo del impacto se asigna siempre al final. Por ello, en las fórmulas normalizadas es conveniente utilizar siempre el valor absoluto de la importancia para realizar los cálculos y únicamente al final del cálculo poner el signo positivo o negativo.

3.7 Conceptos Estadísticos

3.7.1 Pruebas de Normalidad

Uno de los supuestos más importantes a la hora de realizar un procedimiento paramétrico es la demostración de normalidad de la distribución de una variable numérica, es una prueba de hipótesis preliminar. Para ello existen pruebas paramétricas y pruebas no paramétricas.

Las Pruebas Paramétricas

- Se conoce el modelo de distribución de la población objeto de estudio y se desconoce un número finito de parámetros de dicha distribución que hay que estimar con los datos de la muestra.

- Requieren conocer la distribución de la muestra para poder realizar inferencias sobre la población.

Las Pruebas no Paramétricas

- Son métodos de distribución libre. No requieren conocer la distribución de la muestra.
- Se utilizan estadísticos cuya distribución se determina con independencia de cuál sea la distribución de la población.

3.7.2 Pruebas de Normalidad (no paramétricas)

Los siguientes son tipos de pruebas de normalidad que puede utilizar para evaluar la normalidad:

Prueba de Anderson-Darling

Esta prueba compara la función de distribución acumulada empírica (ECDF) de los datos de la muestra con la distribución esperada si los datos fueran normales. Si la diferencia observada es adecuadamente grande, se rechazará la hipótesis nula de normalidad de la población.

Prueba de Ryan-Joiner

Esta prueba evalúa la normalidad calculando la correlación entre los datos y las puntuaciones normales de los datos. Si el coeficiente de correlación se encuentra cerca de 1, es probable que la población sea normal. El estadístico de Ryan-Joiner evalúa la fuerza de esta correlación; si se encuentra por debajo del valor crítico apropiado, se rechazará la hipótesis nula de normalidad de la población. Esta prueba es similar a la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Esta prueba compara la función de distribución acumulada empírica (ECDF) de los datos de la muestra con la distribución esperada si los datos fueran normales. Si esta diferencia observada es adecuadamente grande, la prueba rechazará la hipótesis nula de normalidad de la población. Si el valor p de esta prueba es menor que el nivel de significancia (α) elegido, usted puede rechazar la hipótesis nula y concluir que se trata de una población no normal.

3.7.3 Comparación de las Pruebas de Normalidad de Anderson –Darling, Kolmogorov-Smirnov y Ryan-Joiner.

Las pruebas de Anderson-Darling y Kolmogorov-Smirnov se basan en la función de distribución empírica. La prueba de Ryan-Joiner (similar a la prueba de Shapiro-Wilk) se basa en regresión y correlación.

Las tres pruebas tienden a adecuarse para identificar una distribución no normal cuando la distribución es asimétrica. Las tres pruebas distinguen menos cuando la distribución subyacente es una distribución t y la no normalidad se debe a la curtosis. Por lo general, entre las pruebas que se basan en la función de distribución empírica, la prueba de **Anderson-Darling** tiende a ser más efectiva para detectar desviaciones en las colas de la distribución. Generalmente, si la desviación de la normalidad en las colas es el problema principal, muchos profesionales de la estadística usarían una prueba de Anderson-Darling como primera opción.

3.7.4 Estadístico Anderson-Darling

El estadístico Anderson-Darling mide qué tan bien, los datos, siguen una distribución específica. Para un conjunto de datos y distribución en particular, mientras mejor se ajuste la distribución a los datos, menor será este estadístico. Por ejemplo, se puede utilizar el estadístico de Anderson-Darling para determinar si los datos cumplen el supuesto de normalidad para una prueba t.

Las hipótesis para la prueba de Anderson-Darling son:

- H_0 : Los datos siguen una distribución especificada
- H_1 : Los datos no siguen una distribución especificada

Utilice el valor p correspondiente (si está disponible) para probar si los datos provienen de la distribución elegida. Si el valor p es menor que un nivel de significancia elegido (por lo general 0.05 o 0.10), entonces se rechaza la hipótesis nula de que los datos provienen de esa distribución. Minitab no siempre muestra un valor p para la prueba de Anderson-Darling, porque éste no existe matemáticamente para ciertos casos.

También puede utilizar el estadístico de Anderson-Darling para comparar el ajuste de varias distribuciones con el fin de determinar cuál es la mejor. Sin embargo, para concluir que una distribución es la mejor, el estadístico de Anderson-Darling debe ser sustancialmente menor que los demás. Cuando los estadísticos están cercanos

entre sí, se deben usar criterios adicionales, como las gráficas de probabilidad, para elegir entre ellos.

Aunque formalmente muchas pruebas de hipótesis se basan en el supuesto de normalidad, de todos modos se pueden obtener resultados adecuados con datos no normales, si la muestra es lo suficientemente grande. La cantidad de datos que se necesita depende del grado de no normalidad de los datos, pero un tamaño de muestra de 20 suele ser adecuado. La relación entre la robustez ante la normalidad y el tamaño de la muestra se basa en el teorema del límite central. Este teorema demuestra que la distribución de la media de los datos de cualquier distribución se acerca a la distribución normal a medida que aumenta el tamaño de la muestra. Por lo tanto, si se necesita hacer inferencias sobre una media de población, el supuesto de normalidad no es fundamental siempre y cuando la muestra sea lo suficientemente grande.

3.7.5 Pruebas de Minitab

Las pruebas no paramétricas no presuponen una distribución específica para la población. Minitab ofrece varias pruebas no paramétricas que se pueden usar en lugar de las pruebas que parten del supuesto normalidad. Estas pruebas pueden ser particularmente útiles cuando se tiene una muestra pequeña que es asimétrica o una muestra que contiene varios valores atípicos.

3.7.6 Interpretación de los Estadísticos y Gráficas para Pruebas de Normalidad.

Media: La media describe la muestra con un solo valor que representa el centro de los datos. Se calcula como el promedio de los datos, que es la suma de todas las observaciones dividida entre el número de observaciones.

N: El tamaño de la muestra (N) es el número total de observaciones en la muestra.

Interpretación:

El tamaño de la muestra afecta la potencia de la prueba. Por lo general, con un tamaño de muestra más grande, la prueba tiene más potencia para detectar una diferencia entre los datos de la muestra y la distribución normal. Es decir, cuando realmente existe una diferencia, se tiene mayor probabilidad de detectarla con un tamaño de muestra más grande.

Desv. Est: La desviación estándar es la medida de dispersión más común, que indica la dispersión en la que están los datos con respecto a la media. Una mayor desviación estándar de la muestra indica que los datos están más dispersos alrededor de la media.

AD: El estadístico de bondad de ajuste de Anderson-Darling (AD) mide el área entre la línea ajustada (basada en la distribución normal) y la función de distribución empírica (que se basa en los puntos de los datos). El estadístico de Anderson-Darling es una distancia elevada al cuadrado que tiene mayor ponderación en las colas de la distribución.

Interpretación:

Minitab utiliza el estadístico de Anderson-Darling para calcular el valor p. El valor p es una probabilidad que mide la evidencia en contra de la hipótesis nula. Un valor p más pequeño proporciona una evidencia más fuerte en contra de la hipótesis nula. Valores más grandes del estadístico de Anderson-Darling indican que los datos no siguen la distribución normal.

Valor p: El valor p es una probabilidad que mide la evidencia en contra de la hipótesis nula. Un valor p más pequeño proporciona una evidencia más fuerte en contra de la hipótesis nula.

Interpretación:

Utilice el valor p para determinar si los datos no siguen una distribución normal. Para determinar si los datos no siguen una distribución normal, compare el valor p con el nivel de significancia. Por lo general, un nivel de significancia (denotado como α o alfa) de 0.05 funciona adecuadamente. Un nivel de significancia de 0.05 indica un riesgo de 5% de concluir que los datos no siguen una distribución normal, cuando los datos sí siguen una distribución normal.

Valor $p \leq \alpha$: Los datos no siguen una distribución normal (Rechaza H_0)

Si el valor p es menor que o igual al nivel de significancia, la decisión es rechazar la hipótesis nula y concluir que sus datos no siguen una distribución normal.

Valor $p > \alpha$: No puede concluir que los datos no siguen una distribución normal (No puede rechazar H_0)

Si el valor p es mayor que el nivel de significancia, la decisión es que no se puede rechazar la hipótesis nula. No se tiene suficiente evidencia para concluir que los datos no siguen una distribución normal.

Gráfica de Probabilidad: Una gráfica de probabilidad crea una función de distribución acumulada (CDF) estimada a partir de la muestra al graficar el valor de cada una de las observaciones en función de la probabilidad acumulada estimada de la observación.

Interpretación:

Se utiliza una gráfica de probabilidad para determinar visualmente qué tan bien se ajustan los datos a la distribución normal.

Para visualizar el ajuste de la distribución normal, se examina la gráfica de probabilidad y se evalúa qué tan cerca están los puntos de la línea de distribución ajustada. Las distribuciones normales tienden a ubicarse cerca de la línea recta, a lo largo de ésta. Los datos asimétricos forman una línea curva.

3.7.7 Métodos de correlación

En probabilidad y estadística, la correlación indica la fuerza y la dirección de una relación lineal y proporcionalidad entre dos variables estadísticas. Se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra: si se tienen dos variables (A y B) existe correlación entre ellas si al disminuir los valores de A lo hacen también los de B y viceversa. La correlación entre dos variables no implica, por sí misma, ninguna relación de causalidad.

La relación entre dos variables cuantitativas queda representada mediante la línea de mejor ajuste, trazada a partir de la nube de puntos. Los principales componentes elementales de una línea de ajuste y, por lo tanto, de una correlación, son la fuerza, el sentido y la forma:

- La fuerza extrema según el caso, mide el grado en que la línea representa a la nube de puntos: si la nube es estrecha y alargada, se representa por una línea recta, lo que indica que la relación es fuerte; si la nube de puntos tiene una tendencia elíptica o circular, la relación es débil.
- El sentido mide la variación de los valores de B con respecto a A: si al crecer los valores de A lo hacen los de B, la relación es directa (pendiente positiva); si al

crecer los valores de A disminuyen los de B, la relación es inversa (pendiente negativa).

- La forma establece el tipo de línea que define el mejor ajuste: la línea recta, la curva monótonica o la curva no monótonica.

Los métodos más usados son:

Correlación de Pearson: El coeficiente de correlación de Pearson se utiliza para examinar la fuerza y la dirección de la relación lineal entre dos variables continuas.

La correlación de Pearson es el método más común de correlación.

Rho de Spearman: El coeficiente de correlación de Spearman (también conocido como rho de Spearman) se utiliza cuando la relación entre las variables no sea lineal. Esta correlación mide la relación monótona entre dos variables continuas o dos variables ordinales. En una relación monótona, las variables tienden a moverse en la misma dirección relativa, pero no necesariamente a un ritmo constante. En una relación lineal, las variables se mueven en la misma dirección a un ritmo constante. El coeficiente de correlación de Spearman suele utilizarse para evaluar relaciones con variables ordinales. Si sus datos son continuos, Minitab jerarquiza los datos sin procesar antes de realizar la correlación.

La interpretación de los valores se ha expresado por diversos autores en escalas, siendo una de las más utilizadas la que se presenta a continuación (Hernández y Fernández, 1998).

Tabla 3.4 Categorías del índice de correlación de Rho de Spearman.

RANGO	REALCIÓN
-0.91 a -1.00	Correlación negativa perfecta
-0.76 a -0.90	Correlación negativa fuerte
-0.51 a -0.75	Correlación negativa considerable
-0.11 a -0.50	Correlación negativa media
-0.01 a -0.10	Correlación negativa debil
0.00	No existe correlación
+0.01 a +0.10	Correlación positiva débil
+0.11 a +0.50	Correlación positiva media
+0.51 a +0.75	Correlación positiva considerable
+0.76 a +0.90	Correlación positiva fuerte
+0.91 a +1.00	Correlación positiva perfecta

(Fuente: Hernández y Fernández, 1998)

CAPITULO IV. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

4.1 Condiciones Fisiográficas

De acuerdo con el Inventario de emisiones del año 2006, la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se localiza aproximadamente sobre la línea del paralelo 19 grados de latitud norte, en la porción central del país, entre valles y montañas. Se caracteriza fundamentalmente por sus más de 17 millones de habitantes.

Concretamente, el centro de la metrópoli está en la latitud 19° 30' Norte y en la longitud 99° 02' Oeste, a una elevación de 2,240 metros sobre el nivel medio del mar. Es parte importante de la Cuenca del Valle de México que en su relieve sobresalen elevaciones tales como la sierra de Guadalupe y el cerro del Chiquihuite, en el norte; el cerro de la Estrella en el centro, el cerro de San Nicolás y la sierra volcánica de Santa Catarina en el oriente, la región conocida como la sierra del Ajusco en el sur y suroeste, además de la sierra de las Cruces en el occidente (figura 4.1).

Las elevaciones topográficas más significativas se localizan al oriente del Valle como el volcán Popocatepetl, que cuenta con 5,465 metros de altitud y el Iztaccíhuatl, con 5,230 metros.

Entre los principales caudales que desembocan en esta cuenca, sobresalen los ríos que fluyen desde las sierras, como el de Tacubaya, Los Remedios, Mixcoac, Churubusco y Consulado, estando los tres últimos ya entubados. Otras corrientes de agua significativas son los canales de Chalco, Apatlaco y Cuemanco. Por otro lado, en el seno del área de Xochimilco, en el sur del valle, reside un cuerpo de agua de tipo natural, y más al centro de la ciudad, están los lagos artificiales de San Juan de Aragón y el de Chapultepec.

Históricamente es conocido, que la Ciudad de México se erigió sobre un gran lago, el cual se ha perdido conforme ha avanzado la urbanización.

Según (INEGI, 2017) la Zona Metropolitana de la Ciudad de México se integra por 16 Delegaciones propias de la Ciudad de México, 59 de los 125 municipios en que

se divide políticamente el Estado de México y 1 municipio del estado de Hidalgo (tabla 4.1).

Los límites estatales de toda la ZMCM coinciden, en el norte, con Hidalgo; al oriente, con Puebla y Tlaxcala; al sur con Morelos y al occidente con la cuenca del Pánuco. El uso de suelo urbano corresponde a un 65.5 % de la superficie total, con un 43 % en la Ciudad de México y un 22.5 % en el Estado de México. La zona rural cuenta con el 34.5% restante, con usos de suelo agrícola, pecuario, forestal y de conservación.

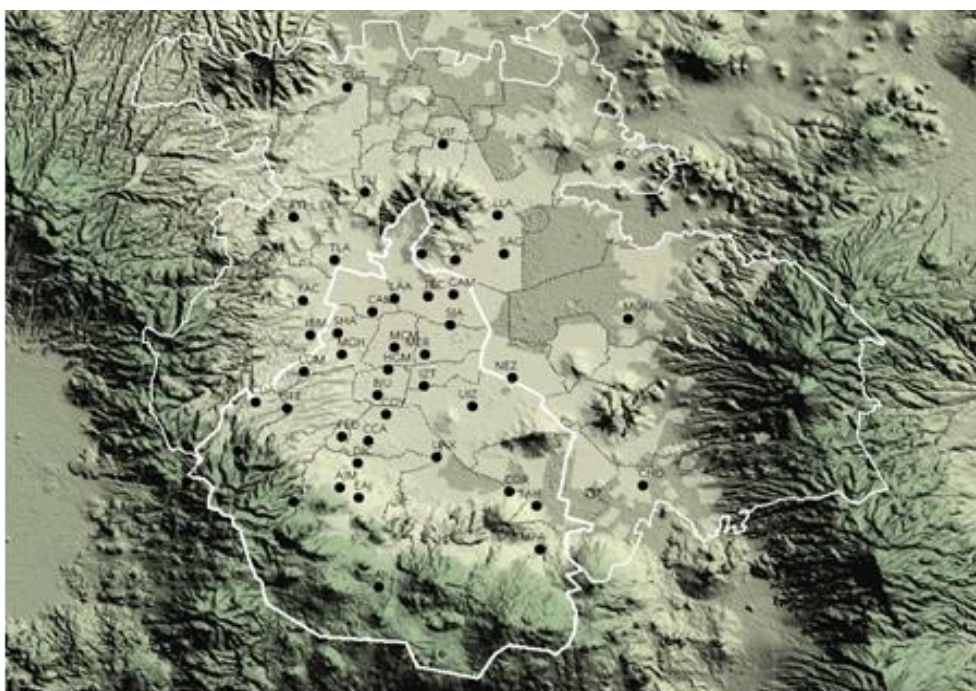


Figura 4.1 Ubicación de la ZMCM y estaciones de monitoreo de la RAMA.

(Fuente: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmM=%27>)

La Zona Metropolitana del Valle de México es considerada como la tercera metrópoli más poblada del mundo, después de Tokio y la Zona Metropolitana de Nueva York-Filadelfia; así como la más grande de América Latina. Según los datos del INEGI, para el 2017 se tenía 19 239 910 habitantes.

Tabla 4.1 Delegaciones y municipios que integran a la ZMCM.

Delegación	Municipio	Municipio	Municipio
Azcapotzalco	Acolman	Hueypoxtla	Temascalapa
Coyoacán	Amecameca	Huixquilucan	Tenango del Aire
Cuajimalpa de Morelos	Apaxco	Isidro Fabela	Teoloyucán
Gustavo A. Madero	Atenco	Ixtapaluca	Teotihuacán
Iztacalco	Atizapán de Zaragoza	Jaltenco	Tepetlaoxtoc
Iztapalapa	Atlautla	Jilotzingo	Tepetlixpa
La Magdalena Contreras	Axapusco	Juchitepec	Tepotzotlán
Milpa Alta	Ayapango	Melchor Ocampo	Tequixquiac
Álvaro Obregón	Coacalco de Berriozábal	Naucalpan de Juárez	Texcoco
Tláhuac	Cocotitlán	Nezahualcóyotl	Tezoyuca
Tlalpan	Coyotepec	Nextlalpan	Tlalmanalco
Xochimilco	Cuautitlán	Nicolás Romero	Tlalnepantla de Baz
Benito Juárez	Chalco	Nopaltepec	Tultepec
Cuauhtémoc	Chiautla	Otumba	Tultitlán
Miguel Hidalgo	Chicoloapan	Ozumba	Villa del Carbón
Venustiano Carranza	Chiconcuac	Papalotla	Zumpango
	Chimalhuacán	La Paz	Cuautitlán Izcalli
	Ecatepec de Morelos	San Martín de las Pirámides	Valle de Chalco Solidaridad
	Ecatzingo	Tecámac	Tonanitla
	Huehuetoca	Temamatla	Tizayuca (Hidalgo)

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México, por su situación geográfica, se encuentra en la región de clima tropical, a pesar de su elevación y relieve que influyen en el comportamiento de los parámetros meteorológicos. En general, las zonas bajas y planas se caracterizan por presentar valores de temperatura y humedad relativa que propician un ambiente cálido y seco; mientras que, en las zonas más elevadas, localizadas en la región de las montañas, hacia el poniente del Valle, predominan las temperaturas más frescas y húmedas.

Considerando la información meteorológica resultante para el año 2006, que se despliega en el Informe Climatológico Ambiental (SEDEMA, 2006), se concluye en varios puntos que merecen la pena destacar. Primordialmente, los valores más altos de la temperatura se obtuvieron en el interior de la ZMCM en horas vespertinas cubriendo una gran extensión del área de estudio, situación influenciada en gran medida por factores urbanos de tipo local como la gran cubierta de asfalto, escasa vegetación, diferencias en el uso de suelo y alto flujo vehicular en dicha zona.

En cambio, las temperaturas más bajas se dieron hacia el oeste de la cuenca, donde la mayor influencia resulta ser la zona montañosa que alberga a las

estaciones Cuajimalpa (CUA) y Tlalpan (TPN), que registran datos más bajos que las demás a lo largo del día (SEDEMA, 2006).

Por otro lado, la humedad relativa siempre fue alta en la región oeste y suroeste de la cuenca, diariamente. En este sentido, los valores más elevados se registraron en las primeras horas de la mañana y durante las noches, que es cuando generalmente se dan los valores más bajos de temperatura ambiente, sobre todo en las cercanías a las montañas y hacia el suroeste de la cuenca, a causa de la cubierta vegetal existente que origina un flujo de aire cargado con mayor porcentaje de vapor de agua sobre dicha zona. La orografía del terreno también obliga al ascenso de aire de manera mecánica, propiciando el transporte de humedad desde los alrededores, lo que gradualmente favorece la condensación y el incremento en la posibilidad de lluvias vespertinas después de formarse las nubes (SEDEMA, 2006).

Acorde con los diferentes campos de viento formados dentro del Valle de México durante el 2006, se determina que la estructura del campo del viento cambia constantemente a lo largo del día y en las diferentes épocas del año, causado fundamentalmente por las condiciones locales del terreno y por las características propias de cada estación del año; pero de manera general, el flujo que se establece lo hace en dos sentidos predominantes dentro del Valle: Uno que se despliega de norte a sur, ingresando desde las afueras de la cuenca; y otro menos marcado, de componente suroeste a noreste, que desciende desde las montañas, generando un vórtice ciclónico característico en la región centro-sureste de la ZMCM (SEDEMA, 2006).

Se destaca, además, que los valores menores a 1 m/s se establecen casi todo el día y durante la mayor parte del año, aunque en algunos casos llegaron a presentarse velocidades de hasta 6 o 7 m/s; pudiendo ser aún mayores en la tarde debido a condiciones meteorológicas un tanto extraordinarias como fuertes tormentas o sistemas atmosféricos que inducen viento fuerte a casi todos los niveles de la troposfera. La ZMCM cuenta con una entrada principal de aire casi libre de obstáculos, en la zona noreste, región por donde el viento ingresa desde un terreno cercanamente plano; y otra entrada secundaria, en la región suroriental con similares características topográficas, pero menos pronunciada en ese sentido. La

circulación de los vientos, en el 2006, predominó con una trayectoria de noreste a suroeste induciendo a las líneas de flujo del viento a curvarse hacia el centro de la ZMCM (SEDEMA, 2006).

Las inversiones de temperatura en la ZMCM se producen durante la madrugada y normalmente desaparecen al transcurrir la mañana, no obstante, pueden durar todo el día. El año 2006 se destacó porque el mayor número mensual de inversiones térmicas fue de 17, en enero; y una de ellas resultó ser la más intensa porque se detectó con 4.0 °C de intensidad, el 17 de enero. En el mismo sentido, la segunda inversión térmica más intensa se registró en el mes de abril y alcanzó una intensidad de 3.2 °C. Por otro lado, y de acuerdo con las series de inversiones térmicas presentadas en este informe, comprendiendo el período desde 1986 hasta el 2006, se acentúa un declive inminente en la presencia de este tipo de parámetro en la ZMCM, siendo muy dramático; esto pudo ser influenciado por el lugar en el que se han realizado los radio sondeos atmosféricos, herramienta necesaria para identificar las inversiones térmicas, ya que cambió alguna vez durante el período (marzo 1998), pudiendo partir la etapa en dos épocas principales para poder ampliar los resultados y conclusiones en trabajos alternos futuros (SEDEMA, 2006).

Lo destacado en el tema de capa de mezclado en el 2006, aparte de que se presenta durante todo el año con diferentes alturas, es que a partir de enero los valores horarios de la altura se incrementaron en la tarde, hasta sobrepasar los 2,000 metros. Esta condición se mantuvo durante los siguientes cinco meses en horas vespertinas y alcanzó un valor máximo de 4,600 metros en marzo; debido en gran medida, al patrón térmico que se manifiesta en las diferentes épocas del año, ya que como se mencionó anteriormente, la altura de la capa de mezclado depende fuertemente del valor de la temperatura superficial alcanzada (SEDEMA, 2006).

Los datos de visibilidad mensual, estimados en tres lugares diferentes de la cuenca, mostraron en forma general que el comportamiento de esta variable fue distinto en los puntos de observación; sin embargo, el comportamiento de la visibilidad es similar en los puntos de observación Aviación Civil y Reforma, de tal manera que la condición se mejora progresivamente hasta alcanzar lo más visible en septiembre, octubre y diciembre con diferencias de aproximadamente 2 km entre ambos lugares;

no así para Santa Lucía, porque los valores son superiores durante todo el año, resultando el sitio con la mejor visibilidad de los tres (SEDEMA, 2006).

La precipitación resulta ser un parámetro complejo para describir, siendo que presenta diferentes esquemas físicos en cualquier lugar y tiempo dados, sobre todo para la región de la ZMCM que se considera como un área lo suficientemente grande donde la precipitación no se distribuye de manera uniforme. La distribución en la ZMCM, de la precipitación acumulada para los meses significativos de cada época del año, se destaca porque en el mes de enero la precipitación fue escasa (de 6 a 12 mm), representativo de lo ocurrido en el invierno; en abril la precipitación aumentó considerablemente con respecto a enero (desde 6 hasta 72 mm); mientras que en julio los valores de la precipitación aumentaron aún más (de 100 a 300 mm) para considerar un verano lluvioso. En octubre los valores descendieron nuevamente (de 15 a 180 mm) para el otoño. En general, los valores más altos (intervalos de 1,300 a 2,000 mm) se dieron en la zona montañosa, en el sur y occidente del Valle; resultando ser más del doble que en el resto de la ciudad, debido en gran medida al efecto orográfico. De manera paralela a las montañas, diagonalmente sobre la ciudad, el acumulado fue intermedio llegando entre los 900 y 1,300 mm de precipitación; en cambio, en el norte y oriente fue escaso en la medida en que se presentaron acumulados desde los 600 hasta los 900 mm e incluso menos. Por lo que respecta a la precipitación máxima diaria alcanzada en el 2006, las mayores cantidades (240 a 340 mm) se registraron en el occidente de la cuenca; mientras que los valores más bajos (80 a 200 mm) se agruparon en el oriente del mismo (SEDEMA, 2006).

4.2 Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT)

La calidad del aire en la ZMCM ha sido considerada por varias décadas como la más deteriorada al compararla con otras ciudades del país y del mundo, debido a las emisiones contaminantes ocasionadas por sectores como el industrial, el de transporte, el de servicios, etc. Esta situación propició que se instrumentara un procedimiento de vigilancia permanente dentro de la Ciudad de México bajo la operación de un Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT), sustentado por la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (SMA-GDF). El SIMAT realiza mediciones de los principales contaminantes atmosféricos como el

ozono (O_3), dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), partículas menores a 10 micrómetros (PM_{10}) y partículas menores a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$); además de parámetros meteorológicos de superficie. Cuenta actualmente con 34 estaciones remotas de monitoreo, localizadas en el Estado de México y el Distrito Federal con 11 y 23 estaciones, respectivamente (SEDEMA, 2006).

Los equipos suministran datos de manera horaria durante todo el año y la información se transmite a un sistema central donde se procesa para su validación. Las estaciones automáticas provistas con instrumental meteorológico son 15. En el Estado de México hay 6 y en el Distrito Federal 9, mismas que establecen el subsistema denominado Red Meteorológica (REDMET). En este tenor, y con el propósito de informar oportuna y puntualmente a la población sobre los niveles de contaminación registrados por el SIMAT, se ha fraccionado a la ZMCM en 5 regiones denominadas “zonas IMECA”, las cuales son: zona Noroeste (NO), integrada por las estaciones de Tacuba (TAC), ENEP Acatlán (EAC) y Tlalnepantla (TLA); la zona Noreste (NE), compuesta por las estaciones San Agustín (SAG), Xalostoc (XAL), Villa de las Flores (VIF) y Chapingo (CHA); la zona Centro (CE), que cuenta con las estaciones Merced (MER) y Hangares (HAN); la zona Suroeste (SO), que la conforman las estaciones Santa Úrsula (SUR), Pedregal (PED), Plateros (PLA), Cuajimalpa (CUA) y Tlalpan (TPN); y finalmente, la zona Sureste (SE), compuesta por las estaciones Cerro de la Estrella (CES) y Tláhuac (TAH) (SEDEMA, 2006).

El objetivo principal de la REDMET es medir temperatura, humedad relativa y viento (dirección y magnitud) en dichas zonas. Algunas estaciones cuentan con instrumentos que miden radiación solar en las bandas UV-A y UV-B del espectro electromagnético (SEDEMA, 2006).

4.3 Condiciones Meteorológicas Típicas

La ubicación geográfica del Valle de México es motivo para que sea impactado por sistemas anticiclónicos ubicados tanto en el Golfo de México como en el Océano Pacífico. Estos sistemas meteorológicos ocasionan estabilidad atmosférica que inhibe el movimiento ascendente del aire y, por lo tanto, también inhibe la formación

de nubosidad, dando lugar a que una gran cantidad de radiación solar incida sobre la superficie terrestre, haciendo que la atmósfera sea altamente fotoreactiva. De esta manera, la radiación solar constituye un primer elemento básico para que los hidrocarburos y óxidos de nitrógeno reaccionen y se lleve a cabo la formación de ozono troposférico y otros gases oxidantes (SEDEMA, 2006).

En la época invernal, la presencia de la Corriente en Chorro, misma que se caracteriza por una fuerte velocidad de los vientos del oeste en niveles altos de la troposfera y un favorable transporte de humedad, genera precipitaciones normalmente no muy importantes en las cuales la orografía juega un papel decisivo. Durante la misma época se presentan incursiones de masas de aire frío y seco, impulsadas por sistemas anticiclónicos situados en la porción centro occidental de Estados Unidos o aún más al norte de ese país, que penetran por la región norte de nuestro territorio y avanzan hacia la zona central, llegando a extenderse sobre la ZMCM, provocando descensos de temperatura, algunas heladas y nevadas, así como estratificación de las capas troposféricas, induciendo la formación de inversiones térmicas en superficie o en capas atmosféricas muy bajas (SEDEMA, 2006).

En la época del verano, identificada también como época de lluvias, la ZMCM se ve afectada por la entrada de aire cálido y húmedo procedente del Océano Pacífico, del Golfo de México y del Mar Caribe. Estas características favorecen el movimiento ascendente del aire e inhiben la formación de inversiones térmicas. La influencia del Golfo de México y el Mar Caribe se manifiesta no solamente por el aumento de la humedad debido al patrón de viento propio de la temporada (los Alisios), sino también a la constante presencia de perturbaciones atmosféricas conocidas como ondas tropicales que propician grandes cantidades de precipitación sobre los lugares por los cuales se desplazan (SEDEMA, 2006).

4.4 Temperatura

La superficie de la Tierra recibe energía proveniente del sol en forma de radiación de onda corta. Se refleja alrededor de un 55 % de dicha radiación incidente y se almacena el 45 % restante en forma de calor, mismo que posteriormente se emite al espacio. La proporción de energía absorbida y emitida es distinta en cualquier parte

del globo, debido a que el tipo de superficie juega un papel fundamental en el balance de energía, variando éste significativamente según la región del planeta. Por ejemplo, los suelos muy húmedos, como pantanos y humedales, actúan en forma de aislante atenuando considerablemente las variaciones de temperatura. Así mismo, la abundante vegetación amortigua dichos cambios, ya que almacena gran cantidad de humedad, mitigando la transferencia de calor entre la tierra y la atmósfera. Todos estos factores dan origen a un calentamiento desigual de la superficie terrestre, condición que genera diferencias, a veces muy significativas, en los patrones térmicos horizontales del planeta (SEDEMA, 2006).

Pero las variaciones de temperatura también se presentan con la altitud, de forma tal que la temperatura ambiente disminuye a lo largo de la troposfera hasta alcanzar la región conocida como estratopausa, donde la temperatura permanece casi constante; posteriormente se incrementa con respecto a la vertical, en la estratosfera. La razón de la variación térmica con la altura recibe el nombre de Gradiente Vertical de Temperatura (GVT). En la troposfera, el GVT promedio equivale a seis y medio grados Celsius por cada mil metros de altura (6.5 °C/1000 m). Aunque esto es lo normal, frecuentemente se registran capas en la troposfera donde se detecta que los valores se incrementan con la altura, definiéndose así las capas con inversión térmica. Esta estructura térmica puede presentarse a cualquier nivel de la troposfera (SEDEMA, 2006).

4.5 Humedad Relativa

La evaporación, que se realiza a través de los importantes cuerpos de agua como son los océanos, mares, lagos, lagunas, ríos, etc., junto con la transpiración y respiración de las plantas, los seres humanos y animales, son los principales mecanismos encargados de producir la humedad requerida para el ciclo hidrológico en la atmósfera. La definición de humedad relativa equivale al porcentaje de humedad que contiene una masa de aire, en relación con la máxima cantidad de humedad que podría admitir sin producirse condensación, conservando las mismas condiciones de temperatura y presión atmosférica (SEDEMA, 2006).

4.6 Campos de Viento

La estructura del campo de viento dentro de la cuenca obedece en gran medida a una abertura orográfica casi libre de obstáculos en la región nororiental, donde el

terreno es casi plano. Esta condición específica hace que la dirección prevaleciente de los vientos en superficie a lo largo del año, sea con mayor frecuencia del noreste hacia el suroeste; sin embargo, cuando los sistemas meteorológicos de escala mayor (escala sinóptica) propician vientos fuertes de cierta dirección, normalmente tal dirección se impone dentro de la cuenca, incluso se invierte la dirección antes descrita. Por otro lado, si el viento es débil, tienden a formarse remolinos, lo cual puede ser coadyuvado por las montañas y eventualmente producir altas concentraciones de algún contaminante (SEDEMA, 2006).

4.7 Inversiones Térmicas

En la troposfera es normal que la temperatura del aire disminuya con la altitud (unos 6.5 °C por cada 1000 metros). Sin embargo, en ocasiones se puede encontrar una capa de aire caliente encima de una fría; el espacio o espesor que ocupa dicha capa caliente se le denomina inversión térmica, precisamente porque no se cumple la condición normal antes indicada. Las inversiones térmicas son situaciones meteorológicas que pueden aparecer a cualquier altura desde el nivel del suelo. Propiamente, una inversión térmica no representa ningún riesgo para la salud humana; no obstante, cuando se liberan emisiones contaminantes de escapes y chimeneas, las concentraciones permanecen cercanas al suelo si la inversión tiene su base en superficie o ascienden hasta llegar a la base si la capa de inversión se encuentra a cierta altura donde la capa más caliente de aire hace físicamente difícil atravesarla, quedando atrapadas a ese nivel, sobre todo, si la inversión se ubica suficientemente cercana a superficie, como para no permitir la completa dilución de tales concentraciones. Solamente cuando la energía solar iguala las temperaturas de la base y del tope de la inversión, se “deshace” la inversión térmica y los contaminantes pueden transportarse horizontal y/o verticalmente.

Las inversiones térmicas son más frecuentes e intensas en la época invernal, aunque también aparecen en el verano, si bien con menos intensidad y frecuencia (SEDEMA, 2006).

Varias son las causas que dan lugar a la aparición de inversiones térmicas, destacándose las producidas por la radiación, denominadas inversiones radiativas. Estas inversiones se generan durante noches despejadas, cuando el suelo pierde el calor ganado durante el día, enfriándose y enfriando el aire que está en contacto

con él, situación que no se presenta en las capas de aire ubicadas a mayor altura. Las inversiones advectivas se producen por el movimiento horizontal de capas de aire con distinta temperatura quedando la capa de aire frío debajo de otra más caliente. Las inversiones por subsidencia son producidas por el movimiento descendente del aire, mismo que se calienta al moverse hacia la superficie desde cualquier capa de la troposfera. La presencia de inversiones térmicas en altura sobre una urbe provoca la acumulación temporal de contaminantes conocida como “capa de smog” color ocre, debida a la presencia de óxidos de nitrógeno y partículas suspendidas. Por lo general, en la ZMVM las inversiones térmicas se “rompen” antes del mediodía, y cuando esto sucede, la capa de “smog” se dispersa con el aumento del espacio en la vertical. Los parámetros que definen una inversión térmica son: espesor, el cual se define como la diferencia en metros entre la cima o tope de la inversión y la base de la misma; intensidad, la cual es la diferencia en grados Celsius (u otra escala), entre la temperatura de la cima y la de la base; temperatura de ruptura, que es el valor que se requiere que alcance la temperatura de la base de la inversión para igualar la temperatura de la cima de la inversión; hora de ruptura, es el momento en que se alcanza la temperatura de ruptura, la cual se puede estimar para conocer cuándo podrían mejorar las condiciones de dispersión de los contaminantes del aire. En la figura 1 se muestran los parámetros de una inversión; se aprecia que existen 3 inversiones térmicas en el diagrama y solo se muestran los parámetros de una de ellas (SEDEMA, 2006).

4.8 La Capa de Mezcla

La Capa de Mezclado es la región de la troposfera donde se dispersan los contaminantes debido a movimientos turbulentos del aire. La altura que alcanza dicha capa es variable durante el día y en cada estación del año, con un mínimo en las mañanas, a la salida del Sol, y un máximo al momento de la máxima temperatura.

Debido a que la altura de la capa de mezclado depende fuertemente de la temperatura, en los meses calientes alcanza valores más altos que en los meses fríos o con mucha nubosidad. La Capa de Mezclado en la ZMCM, generalmente alcanza su altura máxima anual en los meses de abril, mayo y junio (SEDEMA, 2006).

4.9 Precipitación

En la Zona Metropolitana de la Ciudad de México existe una red de estaciones pluviométricas administradas por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México. A través de esta red se ha podido detectar un régimen anual de precipitación definido en los períodos mayo-octubre, mismo que refleja la intensidad y frecuencia de fenómenos meteorológicos sinópticos en las costas del Pacífico y Atlántico. Los otros meses son de sequía, aunque pueden darse lluvias aisladas que no constituyen un régimen definido. Cabe mencionar que, por su gran extensión, la ZMCM presenta un esquema de precipitación desigual (SEDEMA, 2006).

Según (INEGI, 2005) los promedios indican que la mayor cantidad de lluvia se presenta en la parte occidental del Distrito Federal, al pie de la sierra Ajusco-Chichinautzin. Esta situación se presenta por el flujo de viento de verano, durante las lluvias más intensas y reforzada por el levantamiento mecánico del aire que golpea una montaña, rebota y asciende; debido a la humedad suficiente.

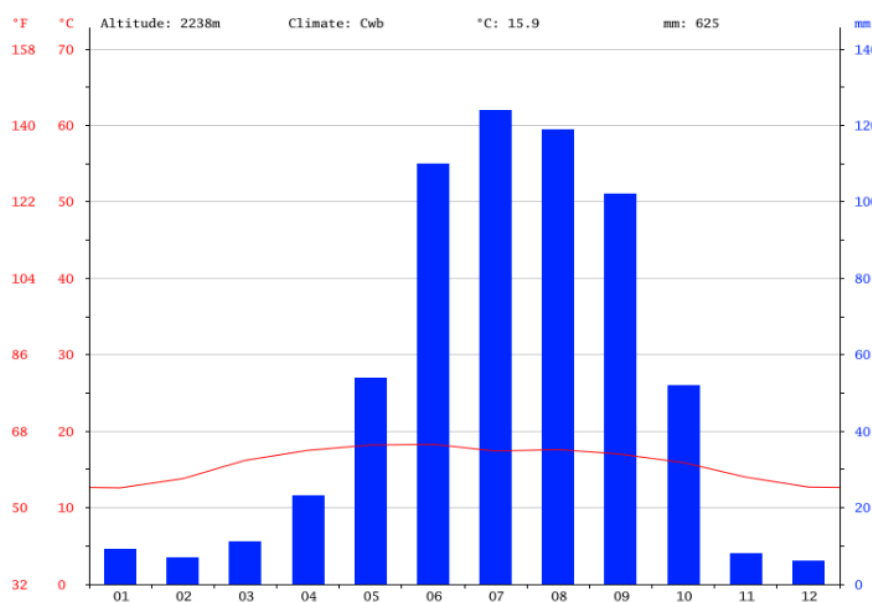


Figura 4.2 Climograma de la ciudad de México.

(Fuente: <https://es.climate-data.org/americadelnorte/mexico/distrito-federal/ciudad-de-mexico-1093/>)

El mes más seco es diciembre con 6 mm como promedio y el mes más lluvioso es Julio con 124 mm aproximadamente. La precipitación promedio es de 625 mm.

CAPITULO V. METODOLOGÍA

El presente trabajo centra su análisis en buscar una asociación entre elementos meteorológicos como altura de la capa de mezcla, temperatura, así como velocidad y dirección del viento con las concentraciones de PM₁₀/ PM_{2.5}, de tal manera que se describe a continuación la metodología que se llevó a cabo para llegar a los resultados.

5.1 Selección de la Serie Temporal

Mediante una previa documentación sobre calidad del aire y meteorología, y con la preocupación de las concentraciones persistentes de PM₁₀ y PM_{2.5} en la ciudad, se determinó que las variables a contemplar para este análisis en meteorología serían, temperatura, precipitación, velocidad y dirección del viento, así como altura de capa de mezcla y para calidad del aire: PM₁₀ y PM_{2.5}, ya que existe incertidumbre en la incidencia que tienen estas variables con las partículas suspendidas, y además teniendo en cuenta que esta información podría ser adquirida de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de la ZMCM. Esta base de datos cuenta con un período de registros desde el año 1995 y 2003 hasta la fecha, para PM₁₀ y PM_{2.5} respectivamente. Sin embargo, el periodo de estudio abarca desde el año 2008 hasta 2015. Se determinó el año 2008 pues hasta esa fecha los datos no se consideran confiables debido a que no están validados.

5.1.1 Selección de las Estaciones de Monitoreo

Con el fin de limitar el estudio, se seleccionó entre las estaciones de la RAMA, aquellas que cumplieran con ciertos criterios para determinar la asociación. De acuerdo con lo anterior, un primer criterio importante era seleccionar una estación que arrojara datos confiables, cabe anotar que a pesar de los esfuerzos de la RAMA algunas estaciones tienen algunos problemas de recolección de la información, sin embargo, la confiabilidad de acuerdo a las auditorías de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA) de las mediciones de la Red es aceptable. El segundo criterio para filtrar las estaciones, fue entonces, el de suficiencia de información.

El tercer criterio fue, seleccionar algunas según las zonas IMECA, ya que es de importancia observar el comportamiento espacial de estos indicadores de la calidad de aire. Luego se aplicaron criterios de calidad de información como:

- Mayor número de datos registrados
- Menor número de datos faltantes
- Menor número de datos faltantes consecutivos

Y por último, se procedió a realizar un análisis de dispersión de las variables meteorológicas registradas por las estaciones más cercanas, para verificar si, por su cercanía, estaban ubicadas o no en una zona de una atmósfera homogénea, y así reducir aún más el número de estaciones a analizar.

5.1.2 Elección de la Compresión de los Datos

La disposición de los datos podría ser de manera horaria, diaria, mensual o anual, sin embargo, para este estudio y gracias a la experiencia de ciudades como Santiago de Chile y la propia Ciudad de México, el manejo de la información, para este tipo de asociaciones debe hacerse de manera horaria, ya que es la compresión mejor observada por el comportamiento de partículas menores a 10 y 2.5 micras.

5.2 Validación de la base de datos

La validación de la base de datos de la RAMA, se realizó bajo los criterios contemplados por el grupo de la RAMA, y por algunos expertos en Meteorología, quienes han analizado estas series y comportamientos del clima en la Ciudad de México, siendo los criterios tomados para dicha validación los siguientes:

- Eliminación de datos negativos o nulos, debido a que las estaciones de monitoreo tienen un mínimo detectable mayor a cero para registrar las concentraciones de PM₁₀, velocidad del viento y precipitación. Algunas bases de datos presentaban registros de -1,-5, etc., para las variables anteriormente mencionadas, por lo cual este tipo de datos fueron anulados de la serie.
- Identificación de los valores que presentan un comportamiento fuera del patrón que siguen los contaminantes en un determinado período de tiempo, los cuales son identificados y validados con los responsables de las redes de monitoreo. En algunas bases de datos se pudo observar mediciones de PM₁₀ de 400, 600 o

1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, velocidades del viento de 60, 70 y hasta 80 m/s, mediciones que se salen del comportamiento normal de dichas variables, ya que por seguimiento a las mediciones anteriores y posteriores no concuerdan con estas, por lo cual este tipo de valores fueron anulados de las bases de datos.

5.3 Análisis Exploratorio de la Serie de Datos de las Estaciones

El análisis exploratorio de la base de datos de las estaciones analizadas se hizo bajo programas estadísticos de acuerdo a las necesidades de los análisis y a la capacidad del software para las salidas.

Los programas que se contemplaron en este proceso fueron: SPSS, Minitab y WRPLOT.

El análisis exploratorio de la información consistió en graficar las series de velocidad del viento, temperatura, altura de la capa de mezcla PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ para observar su comportamiento a través del tiempo, realizar diagramas de dispersión y pruebas de normalidad para cada una de las variables, correlacionar las variables a través de la matriz de Rho Spearman, correlacionar las variables meteorológicas con PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ buscando sus grados de asociación y correlacionar las variables meteorológicas entre sí.

5.4 Valoración cualitativa del impacto en la calidad del aire.

Para la realización de la valoración se procedió al cálculo de la importancia, midiendo la trascendencia de las variables meteorológicas en cuestión sobre el factor alterado (calidad del aire), mediante los atributos descritos anteriormente en el marco teórico. Se tomaron en cuenta dos periodos: el de altas concentraciones de partículas que va desde diciembre hasta mayo y el de concentraciones más bajas que va desde junio hasta noviembre.

Valoración I

Acción impactante: Vientos débiles de componente muy variable

Elemento impactado: Aire

Fase: Período Dic-Mayo

Nombre y descripción del impacto: Deterioro de la calidad del aire.

Las fórmulas seleccionadas para valorar la importancia son:

$$Im = \pm (A + E + In + P + Rv + Rc).$$

$$\text{Fórmula normalizada 1: } I_{NI} = \pm (|Im| - \text{Mínimo}) / (\text{Máximo} - \text{Mínimo})$$

Se valoran los atributos, subjetivamente, como sigue:

Signo: Negativo (-).

Los vientos débiles y con dirección variable se considera un impacto negativo para la calidad del aire ya que, no solo impide la adecuada dispersión de los contaminantes, sino que además se crea una especie de circulación que mantiene a los contaminantes atrapados.

Acumulación simple, acumulativo, sinérgico (A): Acumulativo (3).

El efecto es acumulativo ya que, aunque se ve afectado por otros factores como las emisiones naturales, antropogénicas y otras variables meteorológicas, el efecto es la suma de la contribución de cada uno de ellos.

Intensidad (In): Alta (8).

En este caso se considera que la intensidad es alta (8). Podrían ser medias si se minimizaran las emisiones debido a las fiestas decembrinas y al tráfico desde la ciudad hacia los estados y viceversa, durante el mes de mayo.

Extensión (E): Extenso (3).

Se considera valorado como extenso (3) pues los vientos variables débiles afectan con una intensidad alta, no solo al área donde se emiten las partículas, sino además a toda la ciudad y áreas conurbanas.

Persistencia (P): Temporal (1).

Está claro que este impacto no es permanente, pues se trata de un efecto que puede disminuir debido a un aumento en la velocidad de los vientos o por disminución de las emisiones antropogénicas.

Reversibilidad (Rv): Irreversible (3).

No se puede recuperar de forma natural la calidad del aire primitiva, se necesita de medidas de prevención y en caso necesario, de corrección para recuperar la condición inicial.

Recuperabilidad (Rc): Irrecuperable (3).

Tampoco es posible suponer que se van a adoptar medidas preventivas y correctoras lo suficientemente estrictas como para que se recupere la calidad del aire ya que, estas medidas depende de fondos económicos y voluntades políticas/sociales no disponibles.

Cálculo de la importancia: $I_m = -21$

Este valor, -21, no transmite mucha información, no se sabe si es alto o bajo, por lo que se debe normalizar. Para obtener la importancia normalizada es preciso conocer el mínimo y el máximo valor:

El mínimo valor que se puede obtener con esta fórmula es 6 y el máximo es 25, luego:

$I_N = -0.79$

El valor de este impacto es muy superior a la mitad (0.5) por lo tanto se considera severo.

Valoración II

Acción impactante: Vientos moderados- fuertes de componente poco variable

Elemento impactado: Aire

Fase: Período Jun-Nov

Nombre y descripción del impacto: Deterioro de la calidad del aire.

Las fórmulas usadas fueron las mismas que en el cálculo anterior. A partir de la valoración subjetiva de los atributos correspondientes de obtuvo:

Signo: Negativo (-).

Los vientos moderados-fuertes y con dirección poco variable de considera un impacto negativo para la calidad del aire ya que, favorecen la adecuada dispersión de los contaminantes, transportan contaminantes a su paso desde fuentes emisoras lejanas.

Acumulación simple, acumulativo, sinérgico (A): Acumulativo (3).

El efecto es acumulativo ya que, aunque se ve afectado por otros factores como las emisiones naturales, antropogénicas y otras variables meteorológicas, el efecto es la suma de la contribución de cada uno de ellos.

Intensidad (In): media (4).

En este caso se considera que la intensidad es media (4). Podrían ser bajas si se minimizaran las emisiones en fuentes internas y en aquellas ubicadas viento arriba de la ciudad.

Extensión (E): Extenso (3).

Se considerada valorado como extenso (3) pues los vientos moderados-fuertes afectan con una intensidad media a las áreas viento abajo de la fuente emisora.

Persistencia (P): Temporal (1).

Está claro que este impacto no es permanente, pues se trata de un efecto puede disminuir debido a una disminución de las emisiones antropogénicas o por lavado atmosférico durante eventos de lluvias.

Reversibilidad (Rv): Irreversible (3).

No se puede recuperar de forma natural la calidad del aire primitiva, se necesita de medidas de prevención y en caso necesario, de corrección para recuperar la condición inicial.

Recuperabilidad (Rc): Irrecuperable (3).

Tampoco es posible suponer que se van a adoptar medidas preventivas y correctoras lo suficientemente estrictas como para que se recupere la calidad del aire ya que, estas medidas dependen de fondos económicos y voluntades políticas/sociales no disponibles.

Procediendo de igual manera que en el caso anterior se obtiene:

Cálculo de la importancia: $I_m = -17$, $I_N = -0.58$

El valor de este impacto es cercano a la mitad (0.5) por lo tanto se considera moderado.

CAPITULO VI. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

6.1 Selección de las Estaciones de Monitoreo

De acuerdo al primer criterio de selección (datos confiables) se puede decir que cualquier estación está en la misma posibilidad de ser elegida.

Respecto al segundo criterio (suficiencia de información), se determinó que solo las siguientes estaciones cumplían dicho criterio.

Para PM₁₀: Xalostoc, Tultitlán, Villa de las Flores, Merced, Tláhuac, Tlalnepantla, La Villa, y Pedregal.

Para PM_{2.5}: Xalostoc, Merced, Tlalnepantla, y Pedregal.

Con relación al tercer criterio (Zonas IMECA), las estaciones que cumplían con estas características fueron:

Para PM₁₀: Xalostoc (NE), Merced (CE), Tláhuac (SE), Tlalnepantla (NO) y Pedregal (SO).

Para PM_{2.5}: Xalostoc (NE), Merced (CE), Tlalnepantla (NO) y Pedregal (SO).

Analizando la información de las estaciones elegidas, y teniendo en cuenta que estas coincidían en el número de años registrados, se hizo la priorización de los criterios de calidad de los datos, y se observó que todas las estaciones seleccionadas hasta el momento cumplían con estos criterios.

Contaban con la mayoría de los datos registrados por año, para los años 2008-2015, la continuidad de los datos faltantes no era tan persistente como en otras estaciones y sus datos faltantes eran muy pocos.

Sin embargo, se encontró que, para el caso de la precipitación, solo se contaba con los reportes de las estaciones de Xalostoc y Tlalnepantla, únicamente desde mayo hasta octubre, para cada uno de los años del periodo. Por lo tanto se decidió que, en lugar de filtrar las estaciones, se eliminaría esta variable del análisis. Solo se tomó para demostrar que tanto difieren los registros de datos de esta variable entre una estación y otra, en este caso, para Xalostoc y Tlalnepantla.

Al analizar los gráficos de dispersión de las variables meteorológicas entre pares de estaciones (las más cercanas) se encontró que, para la velocidad del viento, la regresión ajustada explica solo menos del 50% de la variabilidad observada en los

registros. De lo anterior se infiere que, la diferencia de escenarios de velocidad del viento, entre los pares de estaciones, es significativa (ver figura 6.1).

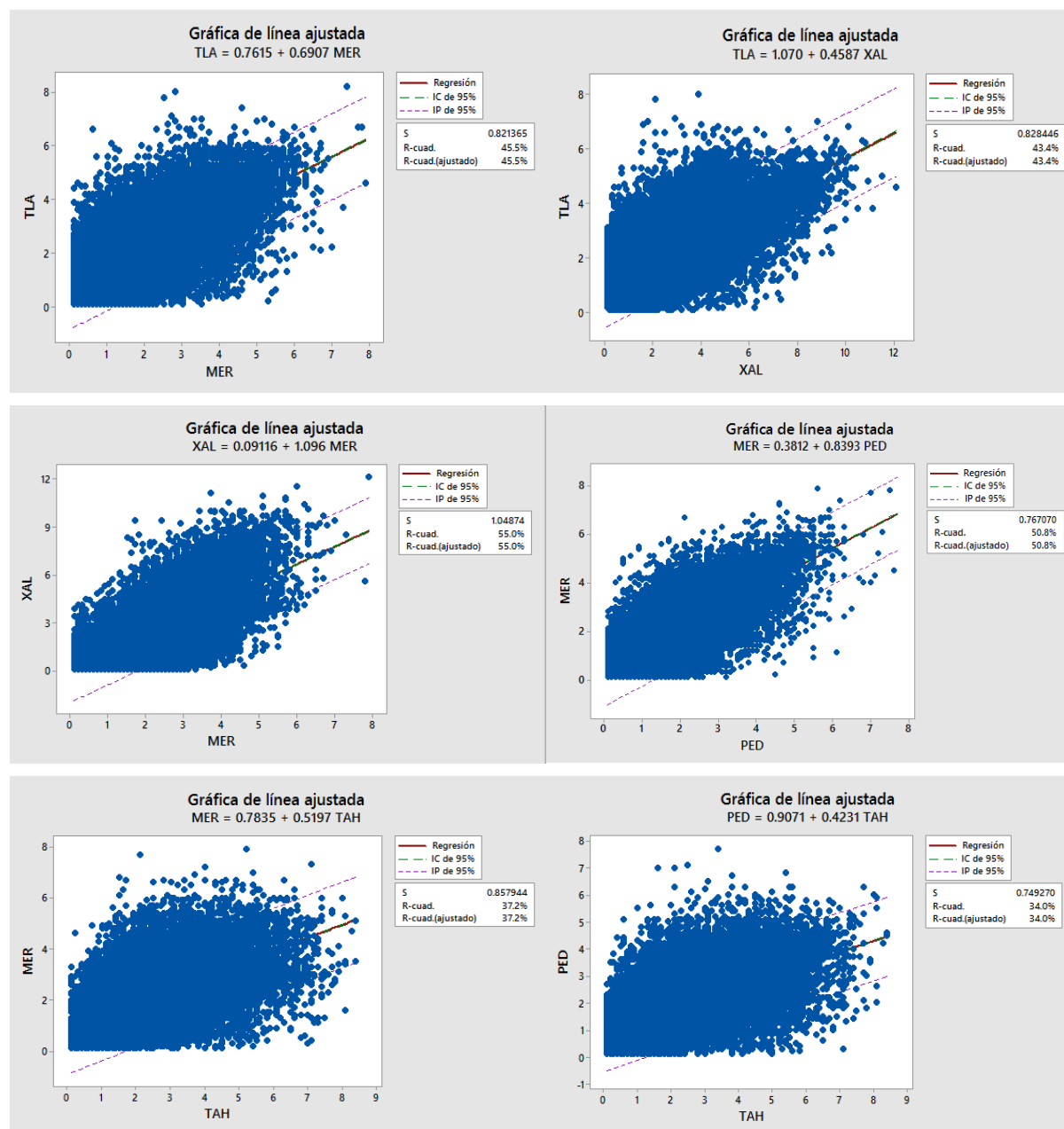


Figura 6.1 Gráficas de línea ajustada para la velocidad de viento (período 2008-2015).

Para la temperatura la regresión ajustada explica en todos los casos, arriba del 90% de la variabilidad observada en los registros. Esto significa que las estaciones se ubican en una zona de una atmósfera homogénea respecto a esta variable por lo que están registrando mediciones muy similares entre ellas (ver figura 6.2)

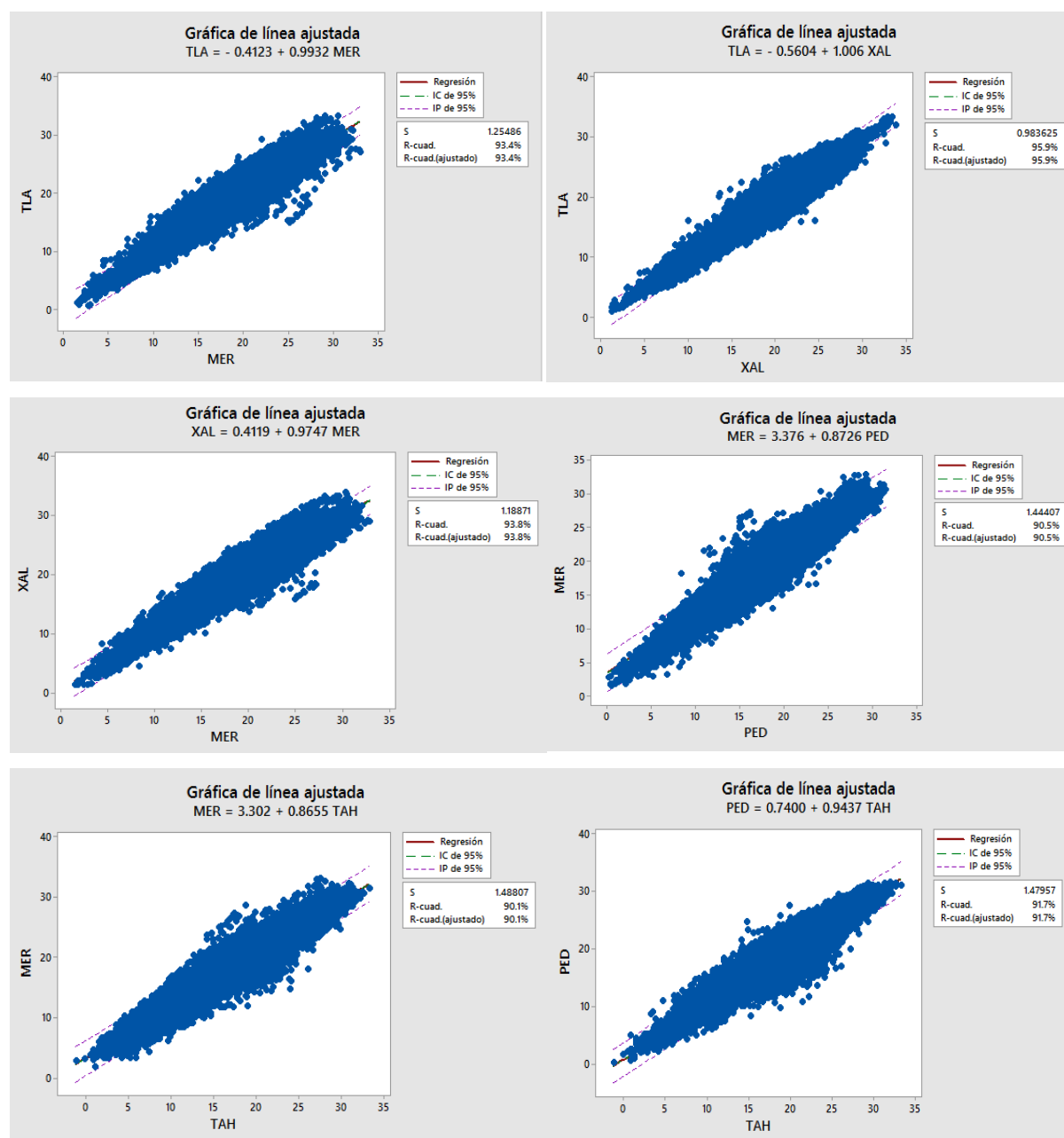


Figura 6.2 Gráficas de línea ajustada para la temperatura (período 2008-2015).

En la gráfica de línea ajustada para la precipitación (figura 6.3) se observa que la relación no es significativa. Tanto el coeficiente de determinación simple como el coeficiente de determinación ajustado arrojaron valores muy bajos. Aunque solo se realizó el análisis para un par de estaciones (Xalostoc y Tlalnepantla) es válido tener en cuenta este resultado para el resto de los pares de estaciones, ya que se trata de una variable discreta.

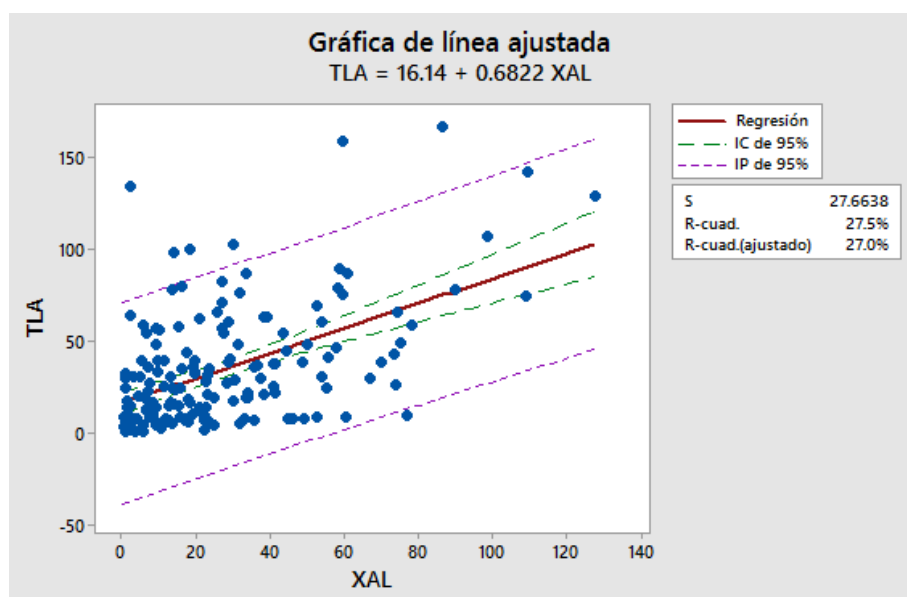


Figura 6.3 Gráfica de línea ajustada para la precipitación (período 2008-2015).

La figura 6.4 muestra las rosas de viento para las estaciones Tlalnepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Tláhuac, para el período 2008-2015, elaboradas a partir de los registros horarios. Se seleccionaron aquellas cuyo perfil es más uniforme: Tlalnepantla –Xalostoc y Pedregal-Tláhuac.

De esta manera quedó establecido que las estaciones seleccionadas para el análisis serían: Tlalnepantla (NO), Xalostoc (NE), Merced (CE), Pedregal (SO) y Tláhuac (SE). A continuación se excluirá la precipitación del análisis exploratorio pues, solo se cuenta con registros en las estaciones Tlalnepantla y Xalostoc para el período de lluvias.

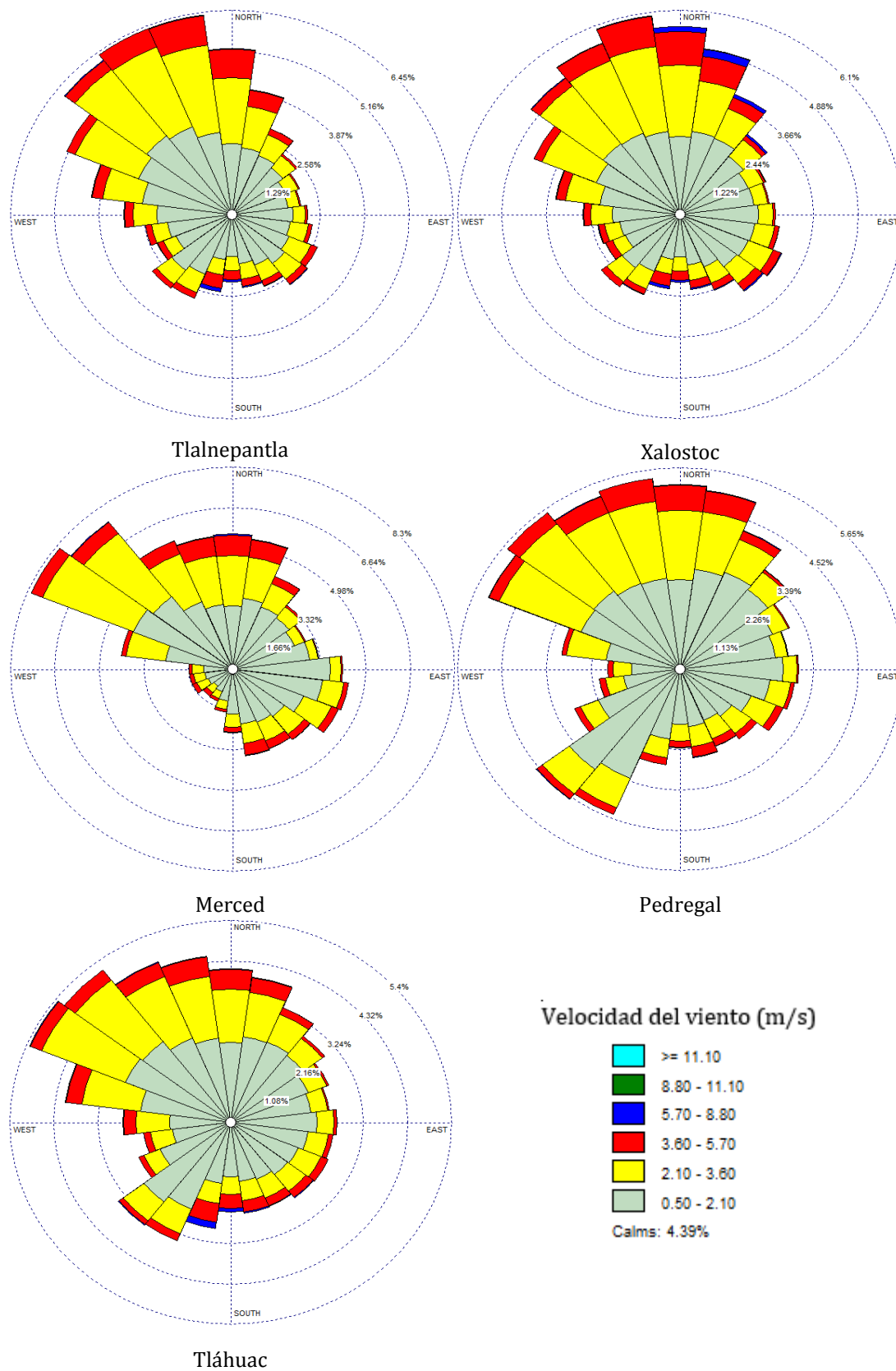


Figura 6.4 Rosas de viento multianuales para las estaciones Tlalnepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Tláhuac. (Período 2008-2015).

6.2 Comportamiento Multianual de PM₁₀ y PM_{2.5}

A partir del análisis realizado a la base de datos de las estaciones de la RAMA se pudo observar el comportamiento de PM₁₀ y PM_{2.5}, el cual se explica a través de las siguientes gráficas de promedios multianuales de dicho contaminante, con un histórico de datos desde el año 2008 hasta 2015.

De acuerdo con la figura 6.5, para PM₁₀, en todas las estaciones analizadas, la concentración de partículas suspendidas tiende a la disminución. En todos los casos se excede el valor promedio anual de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido en la NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, excepto Pedregal para los años 2008, 2009, 2010, 2014 y 2015. Para el caso de PM_{2.5}, se excede la norma en la totalidad de los casos. Se puede observar que para ambas fracciones, especialmente para PM₁₀, la estación de Xalostoc presenta valores muy elevados. Tal es el caso del año 2010 en el que el registro fue de 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aproximadamente.

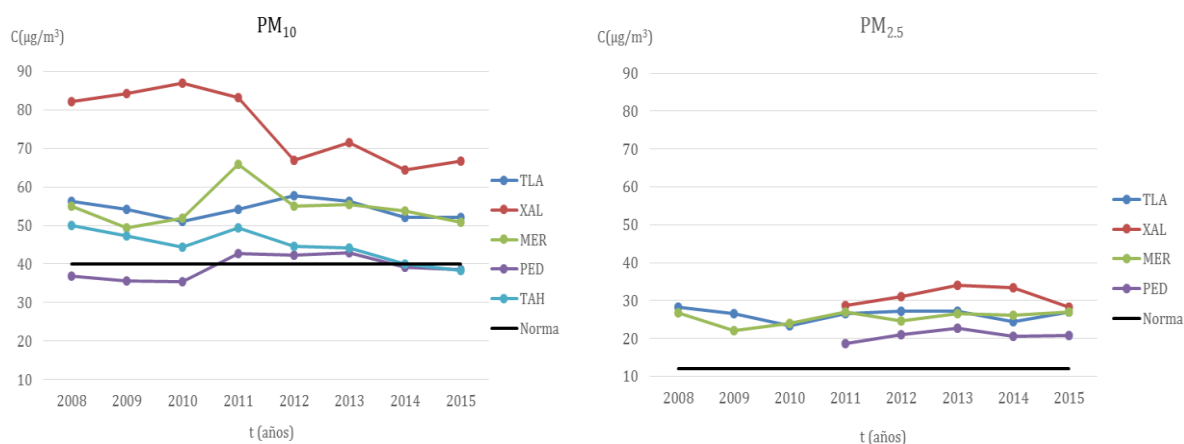


Figura 6.5 Perfil multianual de PM₁₀ y PM_{2.5} en la ZMCM para el período 2008 – 2015.

6.3 Comportamiento anual de PM₁₀ y PM_{2.5}.

En la figura 6.6 se muestra el comportamiento anual para ambas fracciones. De manera general y para cada una de las estaciones, se evidencia un período con altas concentraciones que va desde diciembre hasta mayo y un período de concentraciones más bajas de junio a octubre, con el mes de noviembre como período de transición

Las estaciones analizadas presentan un perfil anual de concentraciones bastante uniforme, con una amplitud máxima de $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$, en ambos.

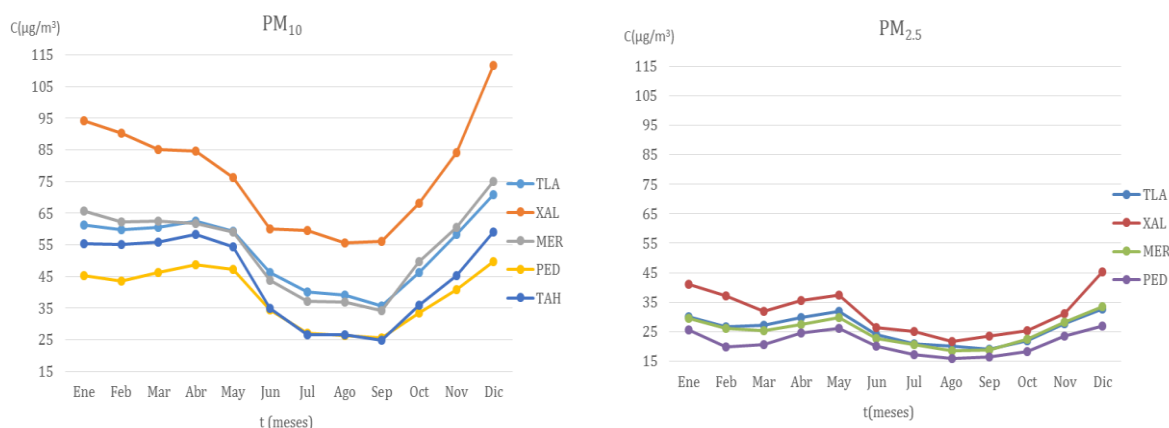


Figura 6.6 Perfil anual de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ en la ZMCM para el período 2008 – 2015.

El perfil que se describe en cada una de las estaciones para PM_{10} refleja que, los mayores promedios de concentraciones (oscilan entre $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $112 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se reportan en los meses de diciembre y enero para Xalostoc y La Merced; y en diciembre y abril para Tlalnepantla, Pedregal y Tláhuac.

Los mayores promedios de concentraciones para $\text{PM}_{2.5}$ (oscilan entre $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se observan en los meses de diciembre, enero y abril; y los más bajos en agosto y septiembre. Este comportamiento es el mismo para todas las estaciones.

Para PM_{10} , los promedios mensuales más bajos (oscilan entre $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se observan en los meses de julio, agosto y septiembre para La Merced, Pedregal y Tláhuac; y solo en julio y agosto para Tlalnepantla y Xalostoc. Para $\text{PM}_{2.5}$ solo en agosto y septiembre y oscilan entre $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

6.4 Comportamiento horario de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$

La distribución de registros diarios de PM_{10} presentó una configuración relativamente uniforme, con dos picos máximos entre 8:00- 10:00 y 17:00-19:00 y un mínimo intermedio aproximadamente a las 14:00 horas.

A partir de las 21:00 horas los valores comienzan a descender, hasta alcanzar los mínimos del día entre las 02:00 y 04:00 de la madrugada y luego los máximos durante el primer pico de la mañana (08:00- 10:00).

Al igual que en el perfil mensual, para el perfil diario, se identificó a Xalostoc como la estación con mayores concentraciones de PM_{10} .

En el gráfico $PM_{2.5}$ se puede observar un comportamiento muy uniforme de todas las estaciones a lo largo del día, presentando un pico de máximos valores entre las 10:00 y 12:00 horas. Los valores mínimos se registran entre 01:00 y 04:00 horas (ver figura 6.7).

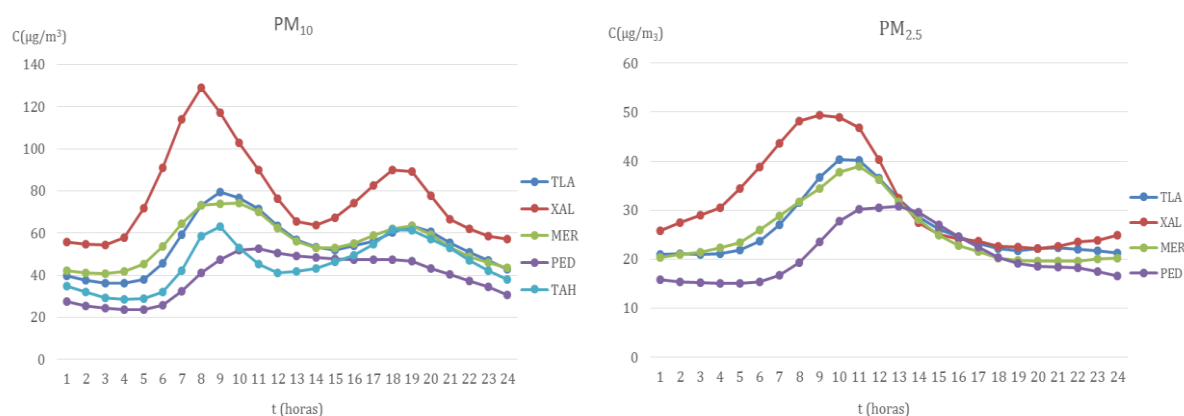


Figura 6.7 Perfil diario de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en la ZMCM para el período 2008 – 2015.

6.5 Comportamiento multianual de la Velocidad del Viento, la Temperatura y Capa de Mezcla.

De acuerdo al comportamiento multianual de las variables velocidad del viento, temperatura y capa de mezcla, mostradas en la figura 6.8, se puede observar como la velocidad del viento mostró un perfil ordenado a partir del año 2011 que oscilaba entre 1,9 m/s y 2.5 m/s, no siendo así los años anteriores, cuando a diferencia de las demás estaciones, Pedregal presentó un promedio anual de 1,1 m/s en 2011.

A lo largo del período de análisis, la temperatura muestra una configuración uniforme entre las estaciones, no siendo así para la estación de Tláhuac la cual mostró un descenso importante de los valores promedios entre 2011 y 2013. Obsérvese como las estaciones Pedregal y Tláhuac, ubicadas al sur de la ciudad, mostraron sus promedios por debajo de la temperatura media calculada a partir de los valores de todas las estaciones contempladas en el presente estudio.

La altura de la capa de mezcla mostró un comportamiento irregular durante el periodo, con un valor máximo en 2009 y el mínimo en 2014 (Ver figura 6.8).

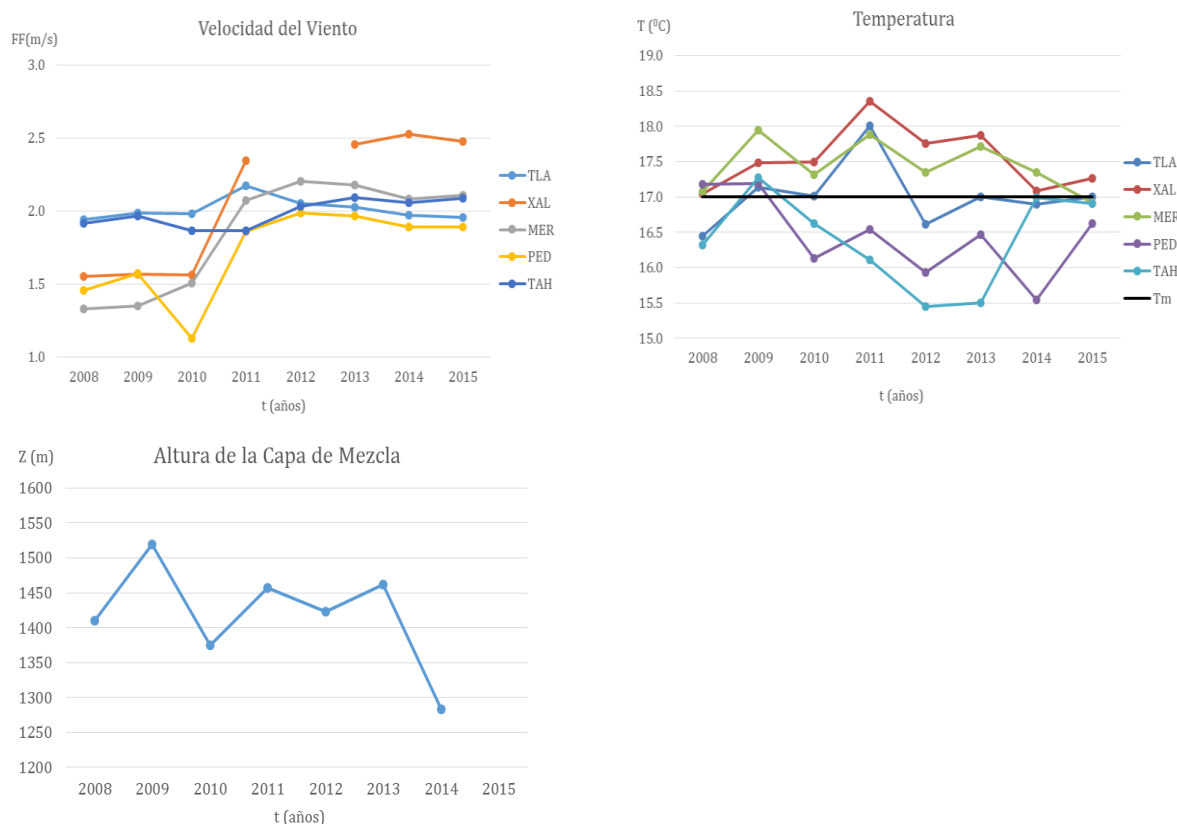


Figura 6.8 Perfil multianual de velocidad del viento, temperatura y altura de capa de mezcla en la ZMCM para el período 2008 – 2015.

6.6 Comportamiento anual de la Velocidad del Viento, la Temperatura y Capa de Mezcla.

Según muestra la figura 6.9, la velocidad del viento presenta un perfil bastante uniforme durante el año, con una amplitud máxima de sus valores de aproximadamente 0.5 m/s. Solo la estación de Xalostc difiere al respecto con un comportamiento desordenado, presentando sus valores mínimos en abril y mayo (0,4 m/s y 0,3 m/s respectivamente), y un poco menos bajos en septiembre. A diferencia del resto de las variables, dicha estación reporta los promedios más bajos durante todo el año, excepto en marzo y agosto, meses en los cuales alcanza sus valores máximos.

Por su parte, la temperatura presenta un perfil uniforme para la totalidad de las estaciones, con amplitudes máxima y mínima en julio/agosto y enero respectivamente. Los promedios máximos del año se alcanzan en los meses de abril y mayo y los mínimos en diciembre y enero.

La altura de la capa de mezcla, comienza a elevar su promedio mensual a partir del mes de enero, alcanzando sus máximos de aproximadamente 1901m y 1847m en abril y mayo respectivamente; y sus mínimos entre julio y enero (ver figura 6.9).

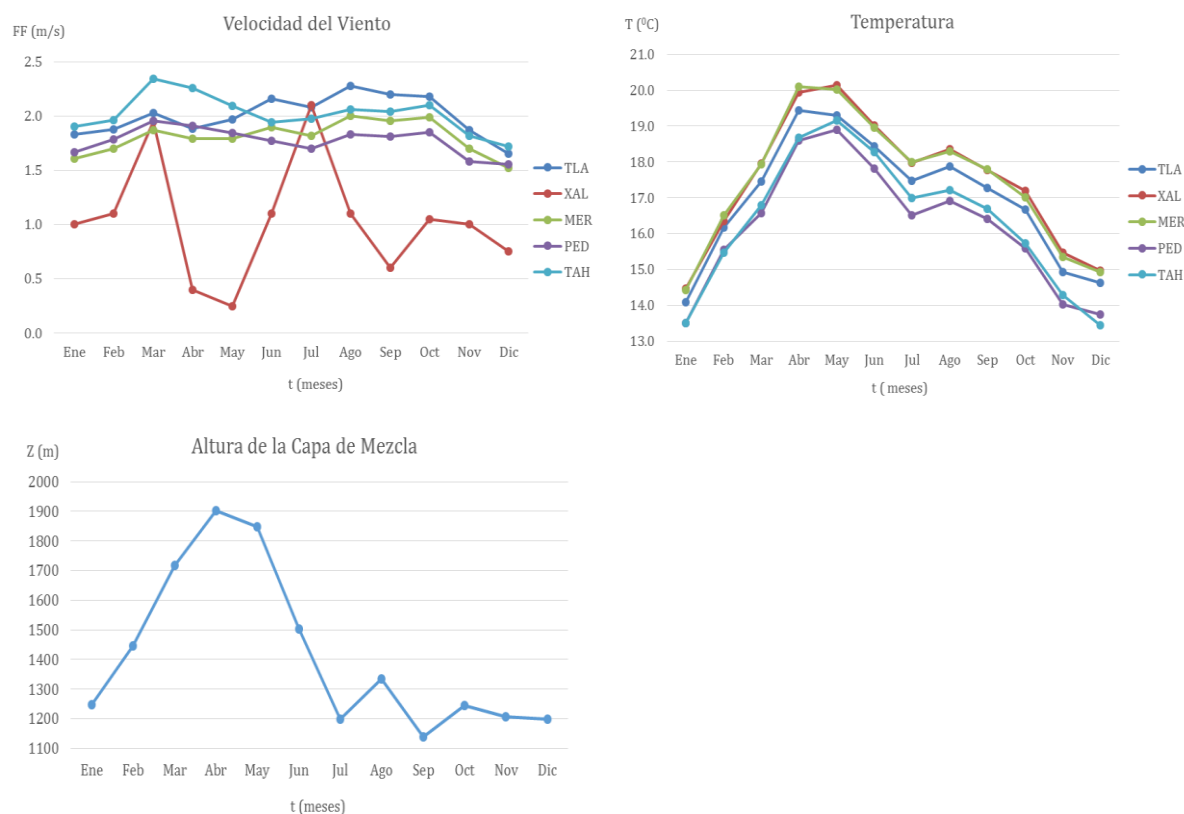


Figura 6.9 Perfil anual de velocidad del viento, temperatura y altura de capa de mezcla en la ZMCM para el período 2008 – 2015.

6.7 Comportamiento diario de la Velocidad del Viento, la Temperatura y Capa de Mezcla.

En la figura 6.10 se puede observar que tanto la velocidad del viento como la temperatura presentan una configuración estable si se comparan cada una de las estaciones.

Los mayores valores promedios de la velocidad del viento se presentan en horas de la tarde/noche, entre las 17:00 y 20:00 horas, y oscilan entre los 2.4 m/s y 3.3 m/s. Sin embargo, en este horario del día se destaca Xalostoc con los valores máximos de la serie de hasta 3.8 m/s. Los menores valores se presentan entre las 6:00 y 8:00 horas, y aunque en algunos casos alcanzan valores de hasta 1.5 m/s, la mayoría se encuentra entre 1.0 m/s y 1.2 m/s.

En el panel de temperatura se observa que los valores máximos del día se alcanzan entre las 14:00 y 17:00 horas y los valores mínimos entre las 6:00 y 7:00 horas.

Por su parte capa de mezcla, según los reportes disponibles, alcanza su máxima altura entre las 13:00 y 14:00 horas (2274m y 2297m respectivamente), así como su menor altura entre 6:00 y 7:00 horas con 60 m y 106 m aproximadamente (ver fig. 6.10).

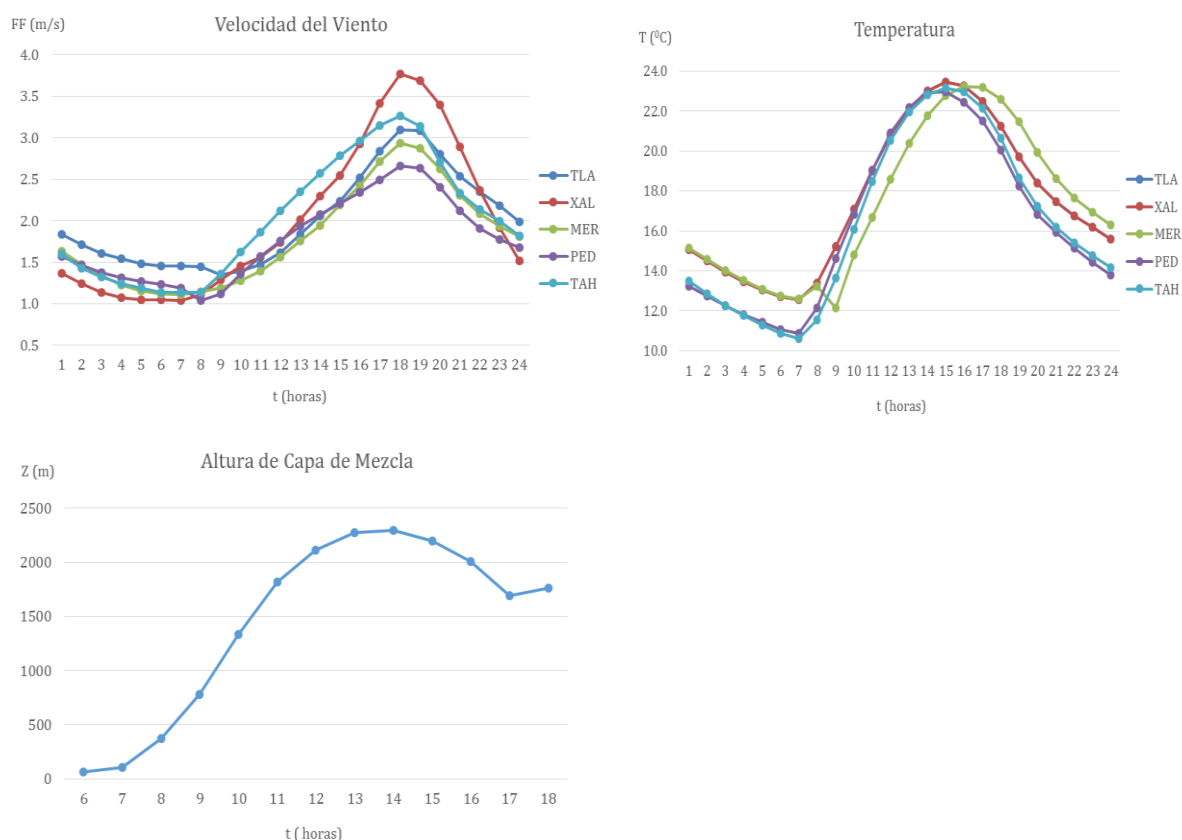


Figura 6.10 Perfil diario de velocidad del viento, temperatura y altura de capa de mezcla en la ZMCM para el período 2008 – 2015.

6.8 Diagramas de Dispersión para PM₁₀ y PM_{2.5}

Teniendo en cuenta que las variables a analizar son series de tiempo, y que los diagramas de dispersión para este tipo de variables son solo una forma de comenzar a observar la información, las inferencias que se hacen al respecto son sólo acercamientos superficiales del comportamiento de los datos. En las gráficas de las figuras 6.11, 6.12 y 6.13 se podría insinuar que existe algún tipo de asociación entre el PM₁₀/ PM_{2.5} y la velocidad del viento, entre el PM₁₀/ PM_{2.5} y la

temperatura y entre el PM_{10} / $PM_{2.5}$ y la capa de mezcla. Además, se observa claramente que este tipo de variables no tienen ninguna relación de tipo lineal.

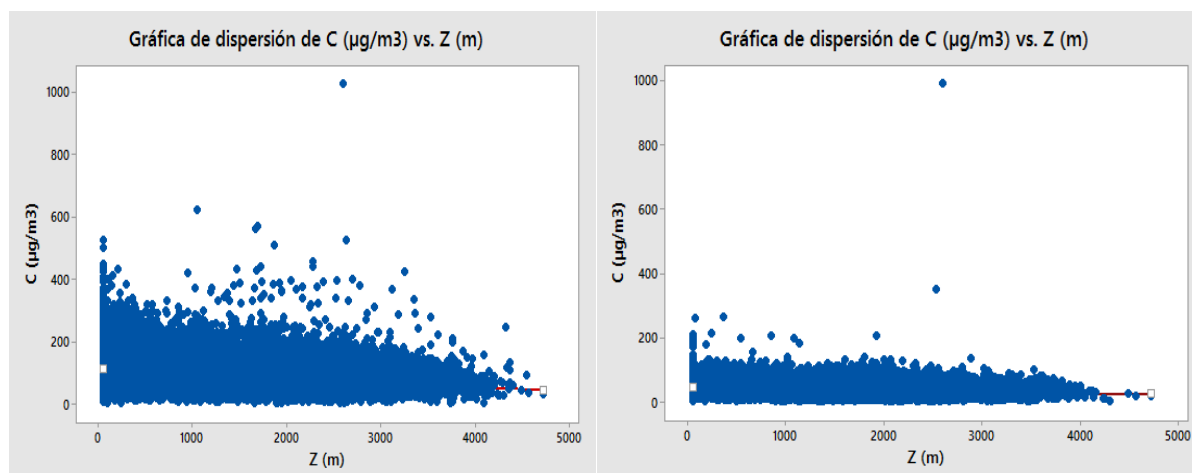


Figura 6.11 Diagrama de dispersión de PM_{10} y $PM_{2.5}$ vs Z para el período 2008 – 2015.

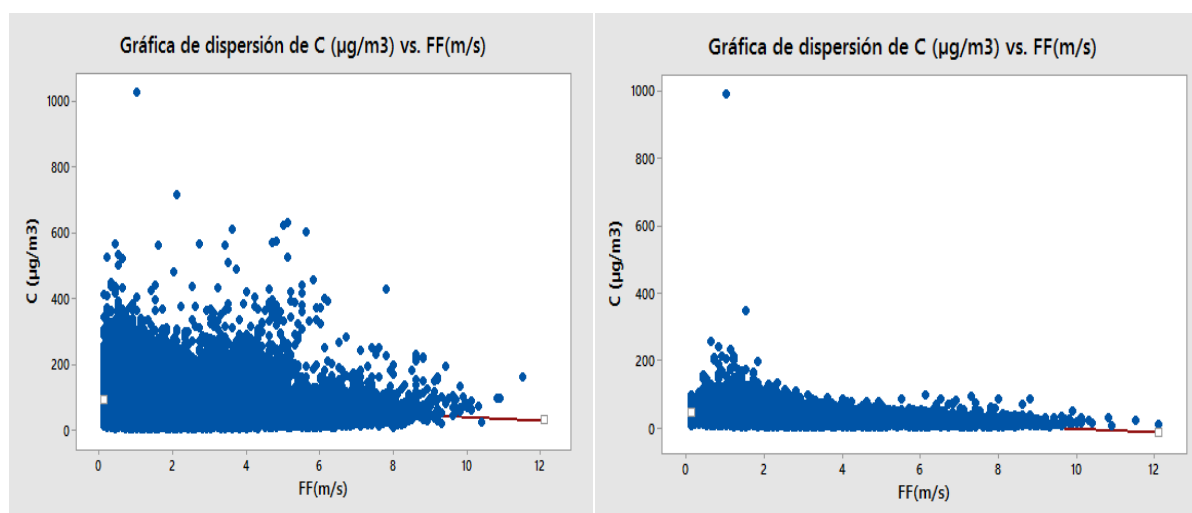


Figura 6.12 Diagrama de dispersión de PM_{10} y $PM_{2.5}$ vs FF para el período 2015-2008.

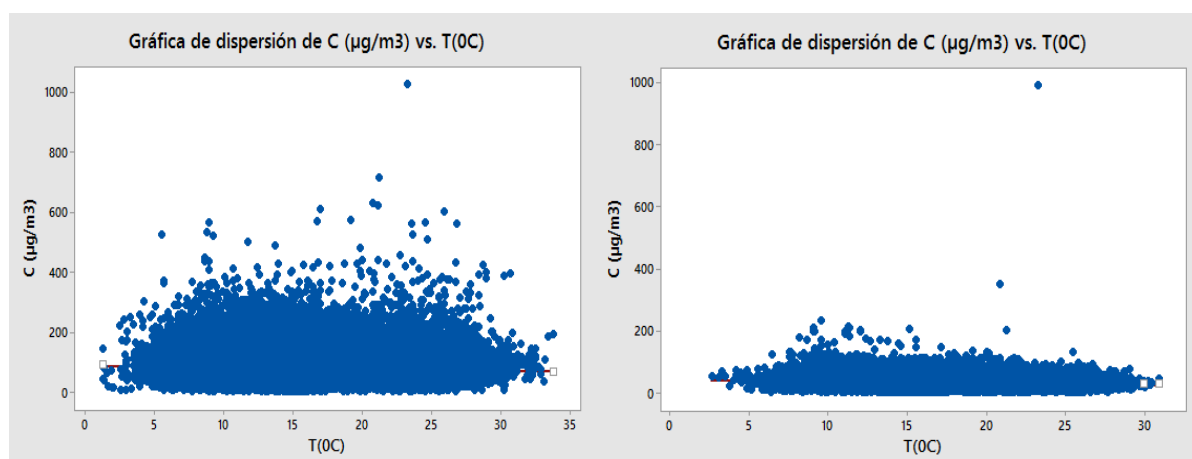


Figura 6.13 Diagrama de dispersión de PM_{10} y $PM_{2.5}$ vs T para el período 2008 – 2015.

6.9 Diagramas de Dispersión entre variables

En las figuras 6.14, 6.15 y 6.16 se elaboraron diagramas de dispersión relacionando las variables meteorológicas entre sí, con el fin de observar si existe una relación entre ellas, de esta forma se puede establecer que algunas variables se comporten igual ante el PM_{10} , teniendo claro nuevamente, que este acercamiento de la observación de la información es sólo el primer paso de un análisis exploratorio.

De esta manera se puede inferir que, podría existir una relación muy marcada entre las variables capa de mezcla y temperatura y un poco menos marcada entre velocidad del viento y temperatura, capa de mezcla y velocidad del viento. De acuerdo a lo observado podría estar identificando que todas las variables podrían considerarse para evaluar la asociación.

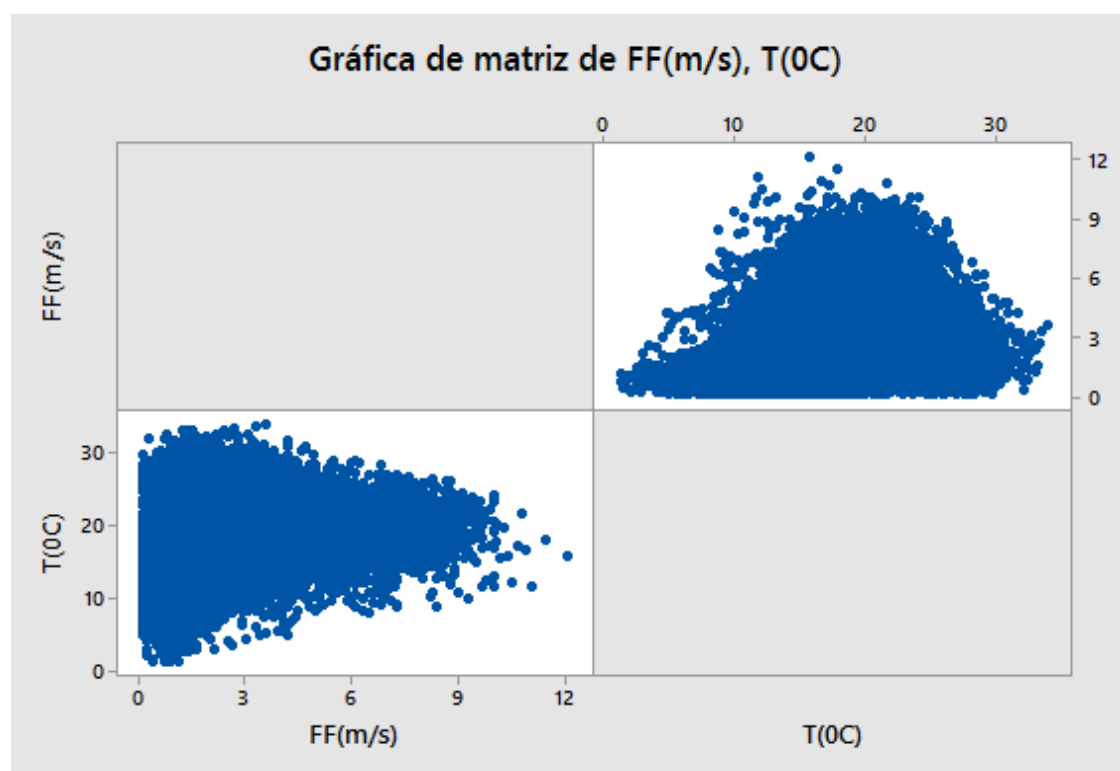


Figura 6.14 Diagrama de dispersión de FF vs T para el período 2008 – 2015.

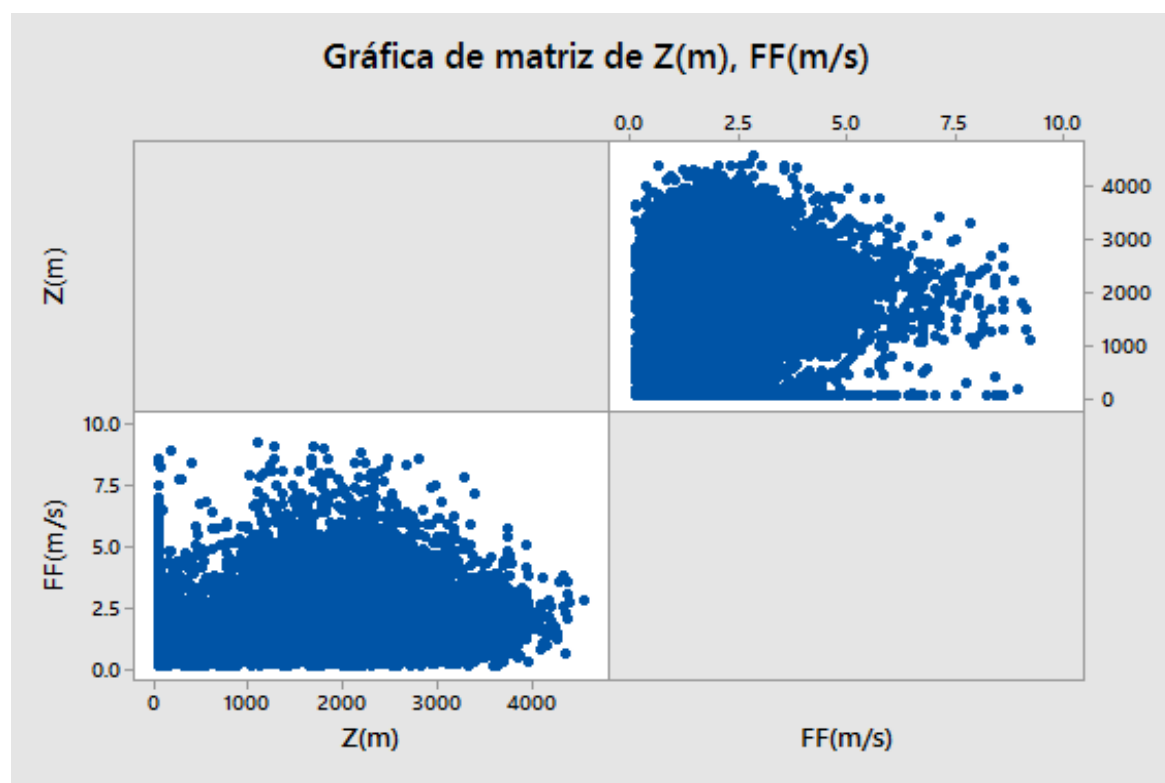


Figura 6.15 Diagrama de dispersión de Z vs FF para el período 2008 – 2015.

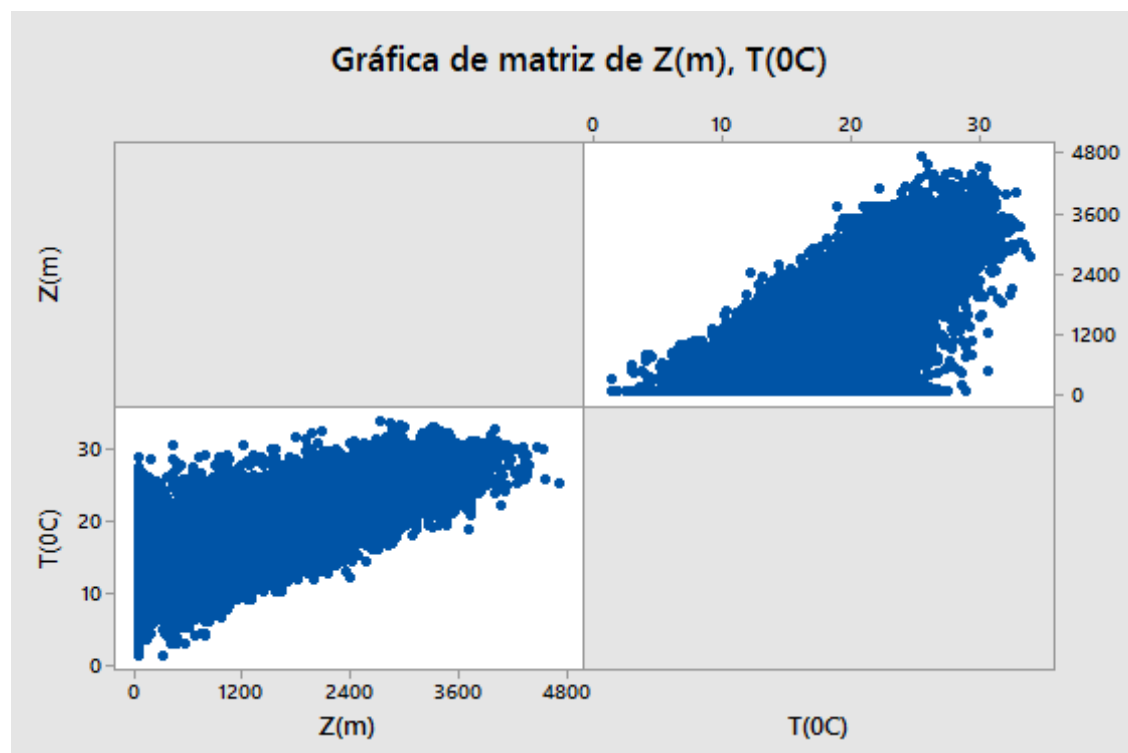


Figura 6.16 Diagrama de dispersión de Z vs T para el período 2008 – 2015.

6.10 Pruebas de Normalidad

En el epígrafe siguiente se hará el análisis de correlación. Para seleccionar el método a utilizar se llevará a cabo la prueba de normalidad para detectar si las series de datos que se utilizarán proceden o no de una distribución normal.

Como el índice de confianza es del 95%, para que la distribución de datos sea normal, p Valor debe ser igual o mayor a 0.05. Por el contrario, si P Valor p es menor a 0.05 entonces los datos no proceden de una población normal. Obsérvese en las figuras 6.17 y 6.18 que, tanto para PM_{10} como para $PM_{2.5}$, altura de la capa de mezcla, velocidad del viento y temperatura el valor p es inferior a 0.05. Por lo tanto, la evidencia no sustenta la hipótesis de que los datos proceden de una población de tipo normal.

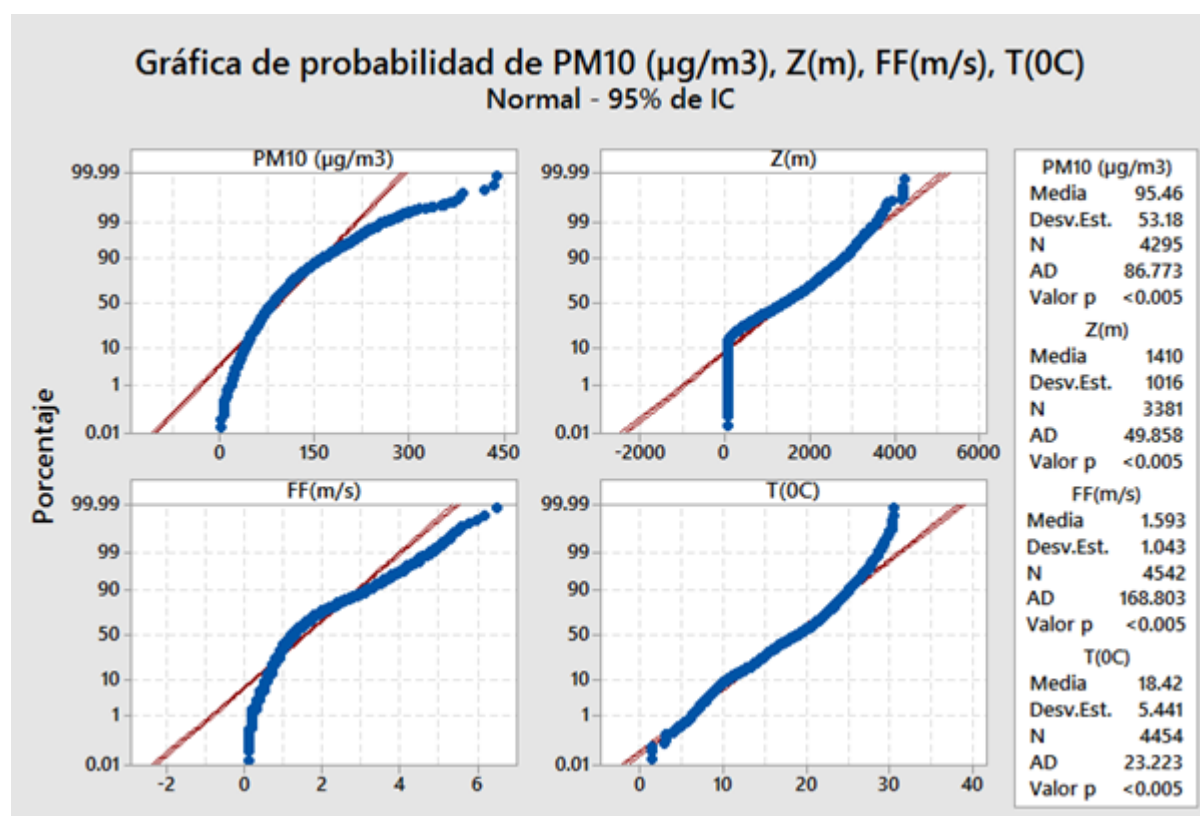


Figura 6.17 Gráfica de probabilidad para el período 2008 – 2015.

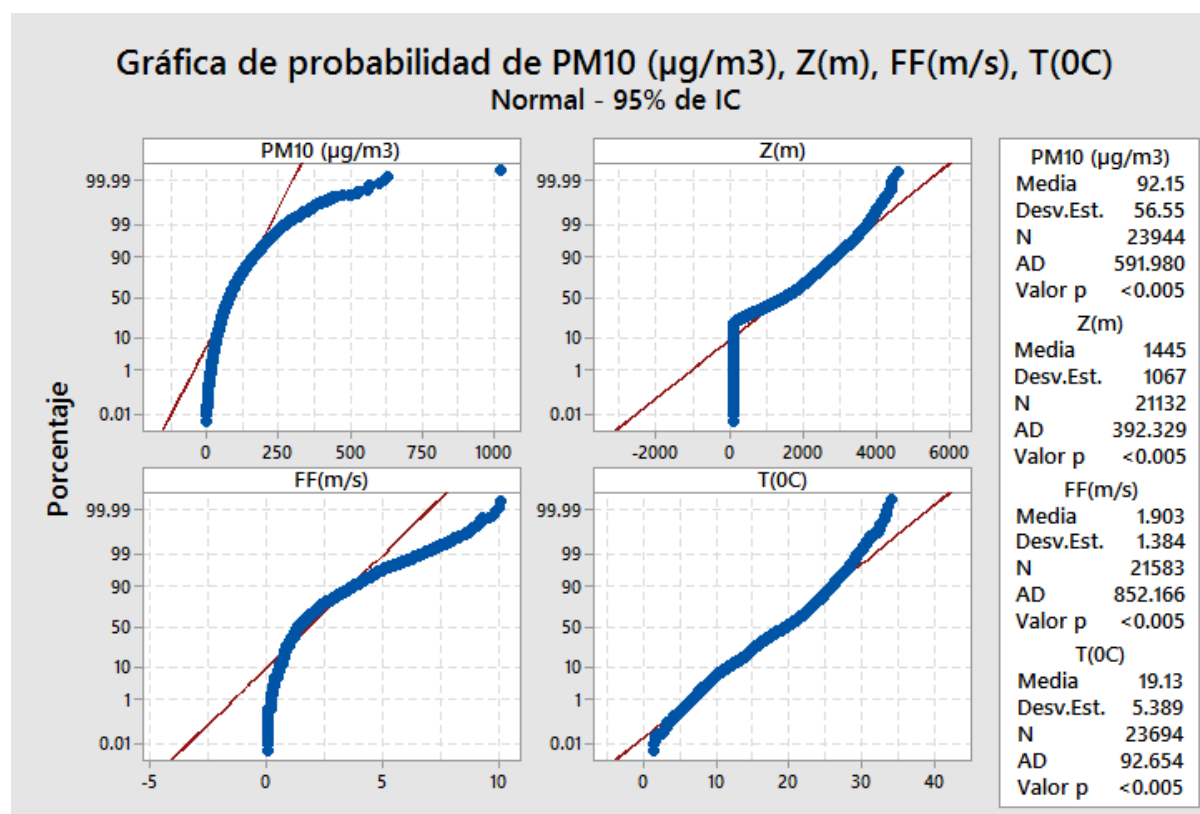


Figura 6.18 Gráfica de probabilidad para el período 2008 – 2015.

6.11 Selección del método de Correlación

Se seleccionó el coeficiente de correlación de Spearman (también conocido como rho de Spearman) ya que, permite obtener un coeficiente de asociación entre variables que no se comportan normalmente. En este caso la relación entre las variables no es lineal.

El próximo paso en el análisis exploratorio, es observar que correlación arroja a través del estadístico de Spearman, teniendo en cuenta que este estadístico mide correlaciones de carácter lineal, sin embargo, como se estableció anteriormente es este procedimiento otro paso del acercamiento a la observación de los datos (ver tablas 6.1, 6.2 y 6.3).

Tabla 6.1 Correlación de Spearman para promedios anuales de PM₁₀, PM_{2.5}, Z, FF y T.

Correlaciones

	PM10 (µg/m3)	FF(m/s)	Z(m)
FF(m/s)	0.179		
	0.702		
Z(m)	0.393	0.571	
	0.383	0.180	
T(OC)	-0.571	0.536	0.464
	0.180	0.215	0.294

Contenido de la celda
Rho de Spearman
Valor p

Correlaciones

	PM2.5 (µg/m3)	FF(m/s)	Z(m)
FF(m/s)	0.071		
	0.879		
Z(m)	0.357	0.571	
	0.432	0.180	
T(OC)	-0.500	0.536	0.464
	0.253	0.215	0.294

Contenido de la celda
Rho de Spearman
Valor p

Tabla 6.2 Correlación de Spearman para promedios mensuales de PM₁₀, PM_{2.5}, Z, FF y T.

Correlaciones

	PM10 (µg/m3)	FF(m/s)	Z(m)
FF(m/s)	-0.839		
	0.001		
Z(m)	0.343	-0.021	
	0.276	0.948	
T(OC)	-0.266	0.524	0.629
	0.404	0.080	0.028

Contenido de la celda
Rho de Spearman
Valor p

Correlaciones

	PM2.5 (µg/m3)	FF(m/s)	Z(m)
FF(m/s)	-0.860		
	0.000		
Z(m)	0.315	-0.021	
	0.319	0.948	
T(OC)	-0.203	0.524	0.629
	0.527	0.080	0.028

Contenido de la celda
Rho de Spearman
Valor p

Tabla 6.3 Correlación de Spearman para promedios horarios de PM₁₀, PM_{2.5}, Z, FF y T.

Correlaciones

	PM10 (µg/m3)	FF(m/s)	Z(m)
FF(m/s)	-0.333		
	0.176		
Z(m)	-0.286	0.566	
	0.344	0.044	
T(OC)	0.203	0.690	0.841
	0.418	0.002	0.000

Contenido de la celda
Rho de Spearman
Valor p

Correlaciones

	PM2.5(µg/m3)	FF(m/s)	Z(m)
FF(m/s)	-0.426		
	0.078		
Z(m)	0.088	0.566	
	0.775	0.044	
T(OC)	0.259	0.690	0.841
	0.299	0.002	0.000

Contenido de la celda
Rho de Spearman
Valor p

Del análisis de la matriz se determinó las siguientes inferencias:

PM₁₀/ PM_{2.5} vs Velocidad del Viento (FF)

La relación que se observa entre estas variables para promedios anuales, es una relación positiva extremadamente débil, lo cual sugiere que, prácticamente no existe relación entre ellas. Sin embargo se sabe que la relación es inversa. Por lo tanto, no se debe tener en cuenta esta relación para evaluar una variación multianual.

Sin embargo, para promedios mensuales es una relación negativa fuerte. Por tanto a un aumento de la velocidad del viento, se observa una tendencia a disminuir las concentraciones de *PM₁₀/ PM_{2.5}*.

Para los promedios horarios se observa que la relación es negativa débil. Esto sugiere que aunque si existe una posible relación, pudiera haber otro factor con un régimen diario con una influencia mayor sobre esta variable.

PM₁₀/ PM_{2.5} vs Altura de Capa de Mezcla (Z)

Se puede observar que la relación entre altura de la capa de mezcla y *PM₁₀/ PM_{2.5}* es positiva y muy débil tanto para los promedios anuales como mensuales, lo que significa que existe alguna relación, pero otros factores influyen aún más. En este caso se puede interpretar como que para ambas escalas de tiempo no existe relación alguna entre las variables pues, la teoría demuestra que a mayor altura de la capa de mezcla, menor será la concentración de partículas.

Para los promedios horarios de *PM₁₀* y, de acuerdo con la teoría, la relación presenta un sentido inverso pero de baja magnitud. Por tanto se asume que no es el régimen diario de la altura de capa de mezcla el principal responsable del comportamiento diario de las concentraciones de partículas. Para *PM_{2.5}* se asume que no existe dicha relación.

PM₁₀/ PM_{2.5} vs Temperatura (T)

En la tabla 6.1 se observa una correlación negativa y moderada entre ambas variables. Se asume que aquellos años con promedio más elevados de temperatura han presentado niveles más bajos de concentración. Ya en la figura 6.2 y 6.3 se observa una relación negativa y positiva, respectivamente, en ambos casos débil, de lo que se interpreta que en la distribución mensual, la temperatura no es tan

determinante en los niveles de concentración y en la distribución diaria no presenta relación.

Capa de Mezcla (Z) vs Velocidad del Viento (FF)

La relación que se observa entre estas dos variables en las tablas 6.1 y 6.3, es una relación positiva fuerte.

Temperatura (T) vs Capa de Mezcla (Z)

De acuerdo a los resultados existe una relación entre estas dos variables, PM_{10}

Velocidad del Viento (FF) vs Temperatura (T)

De acuerdo a los resultados existe una relación entre estas dos variables, que muestra ser de las más fuertes de toda la matriz.

6.12 Relación de PM_{10} y $PM_{2.5}$ con la dirección del viento

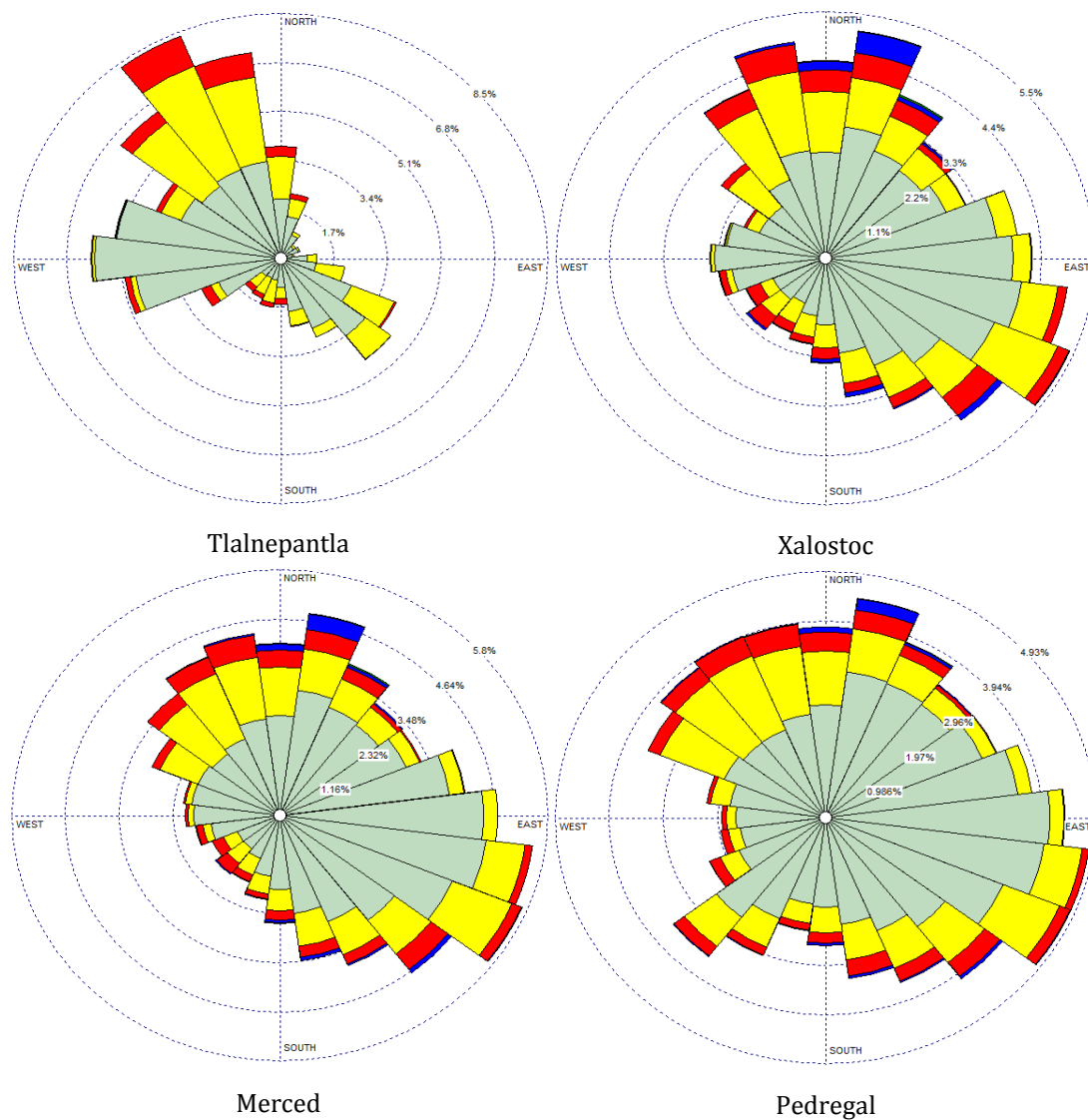
La figura 6.4 muestra la rosa de vientos multianuales para cada estación. Obsérvese que la dirección de los vientos es muy variable, predominantemente del N-NW, con velocidades hasta 8.80 m/s. El rango de velocidad más frecuente es de 0.50-2.10 m/s para un total del 47% al 51% de los datos de la serie. El segundo lugar lo ocupan los vientos con velocidades entre 2.10-3.60 m/s para un total de 17.3% - 30%. El resto de los vientos ocupan por cientos menores en los rangos de velocidades restantes y las calmas van representadas del 3.7% a 5.4% de los datos. En las rosas de vientos anuales (anexo 1) se observan resultados similares (ver tabla 6.4). De igual manera, predominan los vientos con velocidades entre 0.50-2.10 m/s. Nótese que la velocidad de los vientos comienzan a exceder el valor de 5.70 m/s a partir de 2012 y alcanzan valores de hasta 8.80 m/s.

Tabla 6.4 Dirección del viento predominante por año para cada estación.

Estaciones	DD predominante
TLA	N- NW
XAL	N- NE
MER	W-NW
PED	SW
TAH	W-NW

En la figuras 6.19 y 6.20 se muestran rosas de vientos correspondientes a los meses de diciembre y enero, en los cuales se presentan los promedios más

elevados de concentración de PM_{10} . En la figura 6.21 se muestra el mes de abril, en cuyo mes, además de diciembre y enero, se observan los mayores promedios de $PM_{2.5}$ para el período 2008-2015.



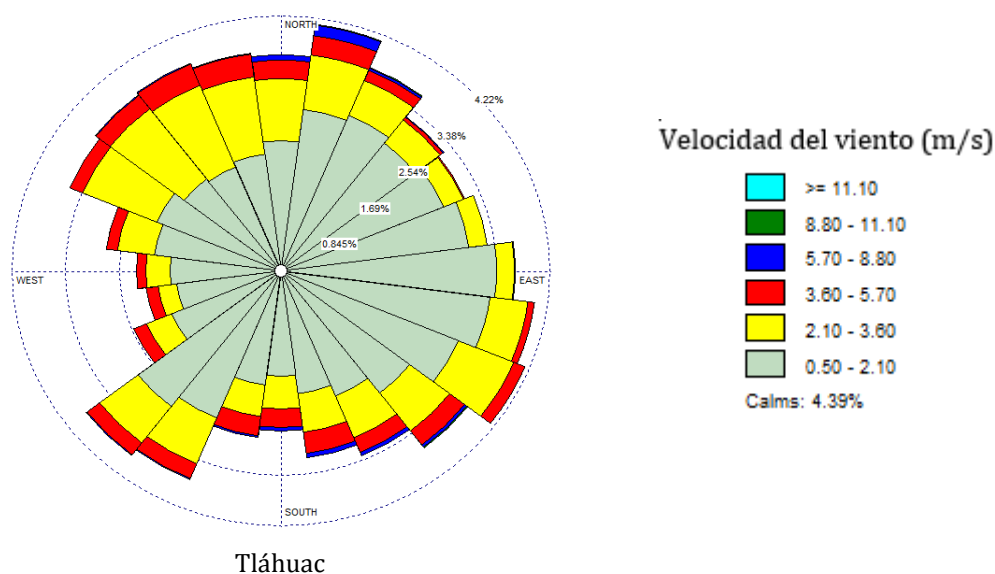


Figura 6.19 Rosas de viento para las estaciones Tlalnepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Tláhuac para el mes de diciembre. (Período 2008-2015).

Obsérvese que en el mes de diciembre, la dirección de los vientos es muy variable y; excepto para Tlalnepantla, la dirección predominante del viento es de E-SE. Aunque en esta dirección se observan vientos entre 5.70-8.80 m/s, la mayor frecuencia en esta categoría proviene del N-NE. Si a dirección e intensidad se refiere, se pueden separar las estaciones de acuerdo a los patrones observados:

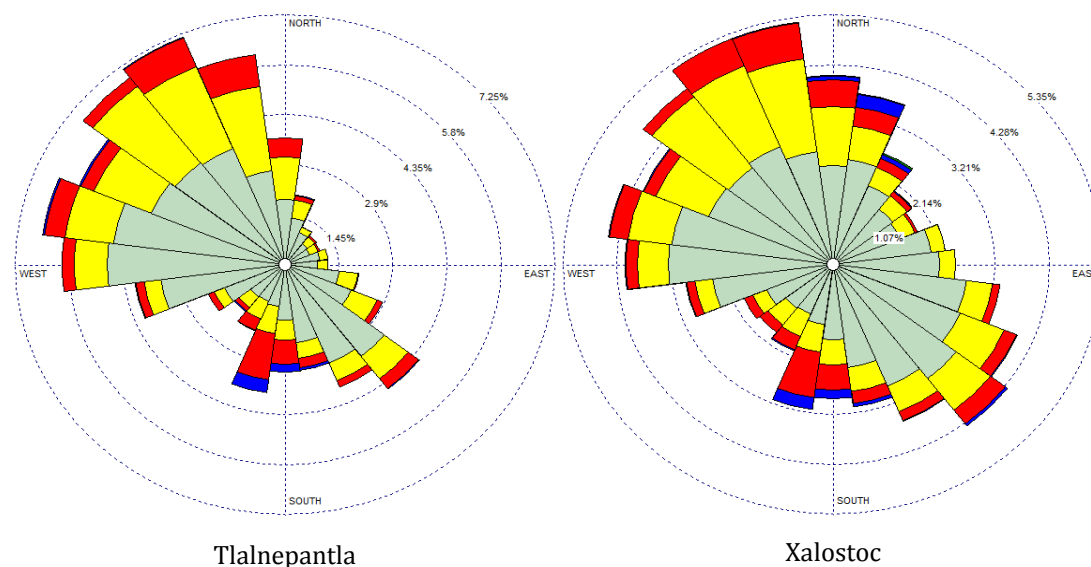
En las estaciones ubicadas al Sur (Pedregal y Tláhuac), los vientos son más débiles, la dirección mucho más variable, con un número considerable de vientos provenientes de SW. Xalostoc y la Merced, con un patrón similar al anterior, en cuanto a la distribución de frecuencias de vientos entre 2.10 m/s y 3.60 m/s. Sin embargo, se observa como disminuye la frecuencia de intensidades entre 0.50 m/s- 2.10 m/s y en cambio, aumentan en el rango de 5.70 m/s- 8.80 m//s. Por último, Tlalnepantla, con una dirección menos variable, más concentrada en el octavo cuadrante y algunos vientos importantes del W. La frecuencia de velocidades entre 0.50 m/s-2.10 m/s es mucho más baja y en cambio aumentan las frecuencias entre 2.10 m/s- 3.60 m/s (ver figura 6.19).

En la figura 6.20 se observan las rosas de viento para el mes de enero. Obsérvese que en la estación de Tlalnepantla la dirección del viento es menos variable que en

el resto y la intensidad llega a alcanzar valores de hasta 5.70 m/s. Los vientos son predominantemente de NW.

En las estaciones de Xalostoc y la Merced los vientos son variables, con dirección predominante del N-NW y NW respectivamente. La intensidad de los vientos alcanza valores dentro del rango 5.70- 8.80 m/s, solo para componentes N-NE y SSW-SE. En la estación Pedregal los vientos son muy variables con dirección predominante del N-NE y una contribución importante del SW. Son muy frecuentes los vientos con velocidades entre 0.50-2.10 m/s y muy escasos los que alcanzan intensidades entre 5.70-8.80 m/s, sin embargo se presentan en todas las direcciones. Finalmente, en la estación Tláhuac, los vientos predominantes son de dirección W-WNW. La frecuencia de vientos débiles es mucho más baja que en el resto de las estaciones analizadas.

De manera general, en ambos meses, se observa el predominio de vientos débiles, asociados a las altas presiones continentales que caracterizan el periodo. Si a esto se le suma la actividad humana, especialmente la práctica de juegos pirotécnicos, resulta inevitable la ocurrencia de eventos que desencadenan las contingencias ambientales, entre otras, por partículas.



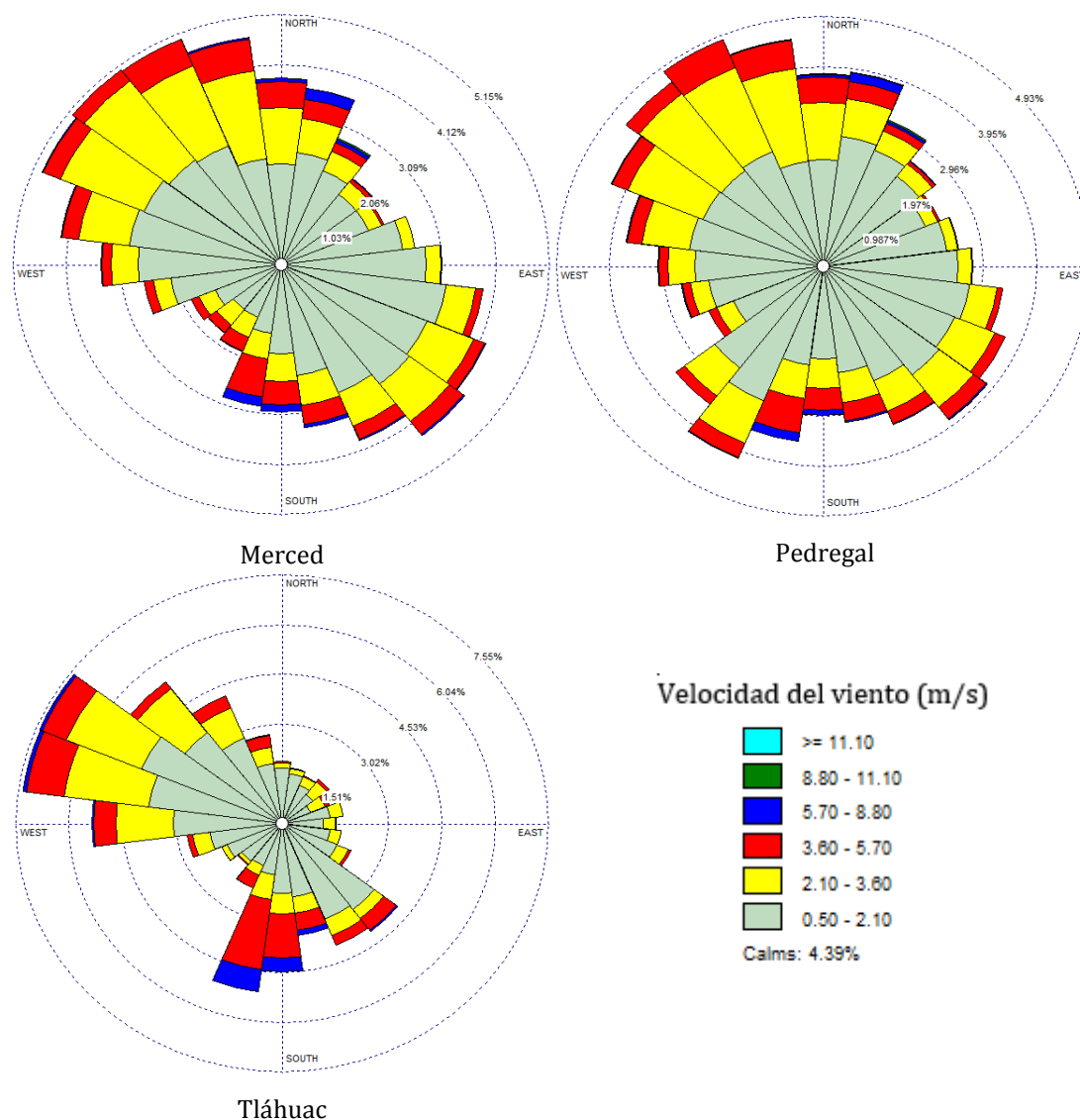


Figura 6.20 Rosas de viento para las estaciones Tlalnepantla, Xalostoc, Merced y Pedregal para el mes de enero. (Período 2008-2015).

En la figura 6.21 se observan las rosas de viento para el mes de abril. En Pedregal y Tláhuac, se observan vientos muy variables en cuanto a dirección, pero con una frecuencia importante, proveniente del segundo cuadrante. En segundo lugar se destacan por su frecuencia e intensidad, los vientos del N-NE, con velocidades superiores a los 5.70 m/s. En el resto de las estaciones el viento predominante es del N-NW y rara vez alcanzan velocidades superiores a los 5.70 m/s.

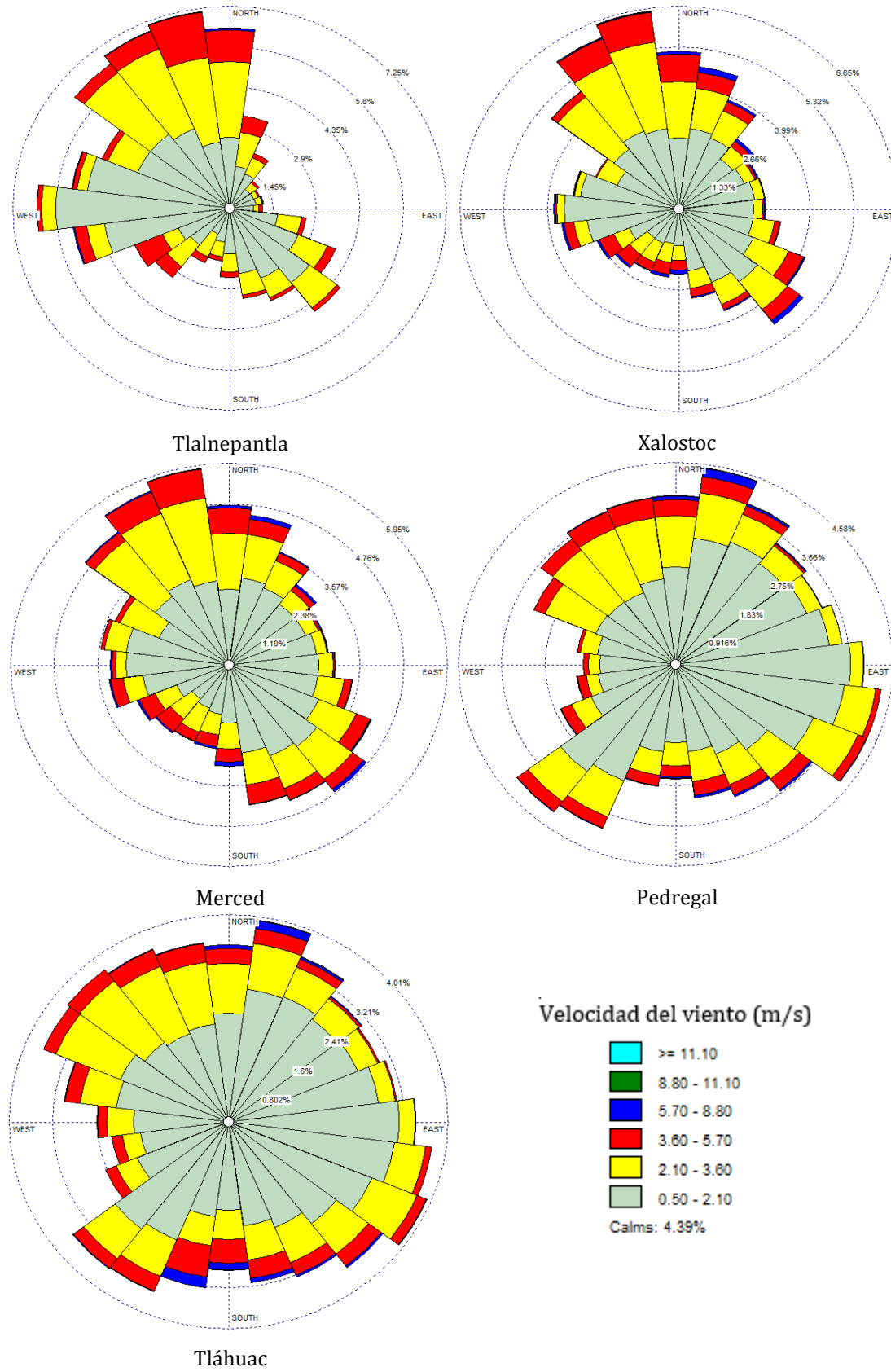
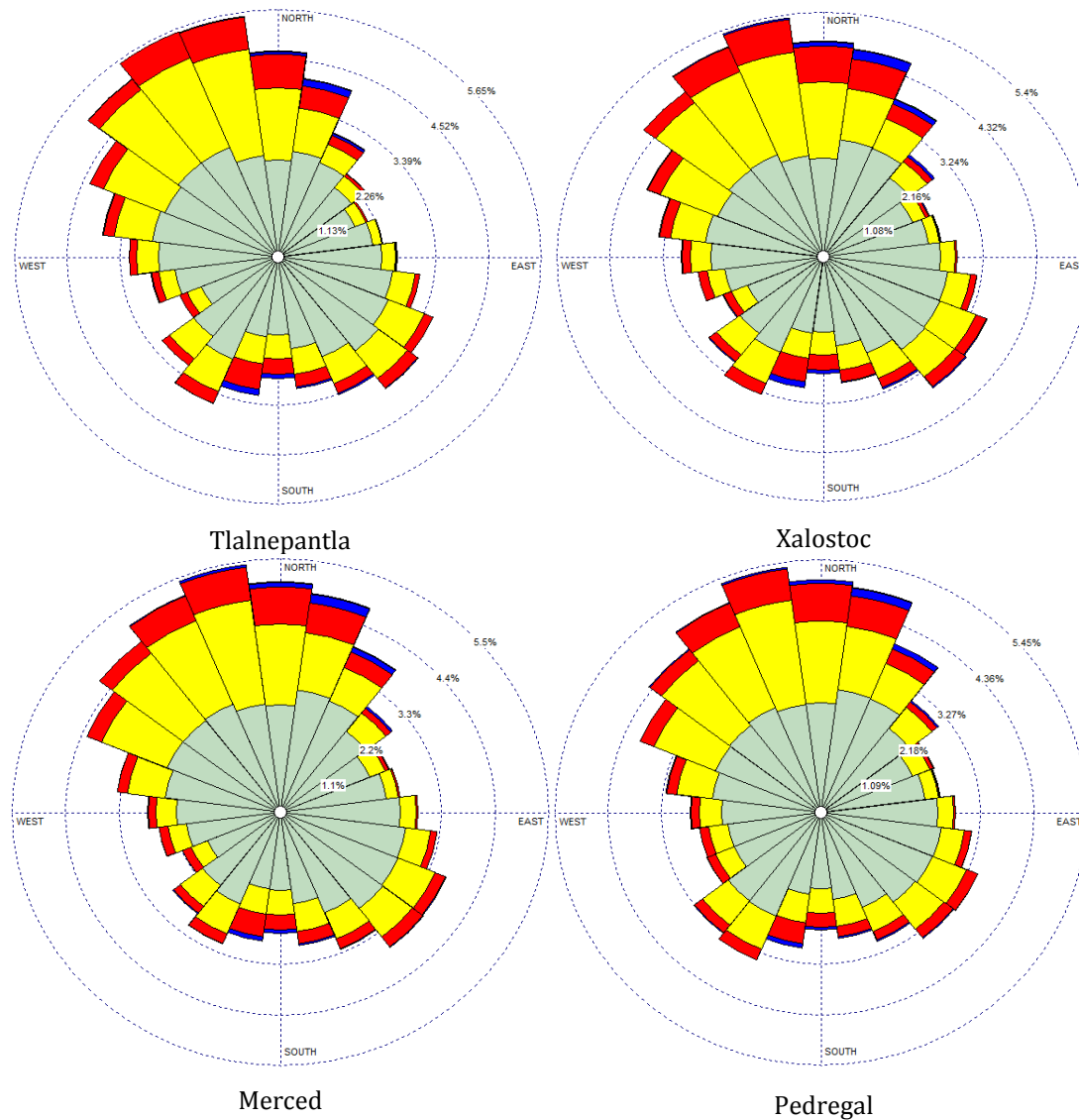


Figura 6.21 Rosas de viento para las estaciones Tlalnepantla, Xalostoc, Merced Pedregal y Tláhuac para el mes de abril (Período 2008-2015).

Como se puede observar, en la figura 6.22, están representadas las rosas de viento del mes de mayo, para cada una de las estaciones. El perfil es muy uniforme en cuanto a dirección e intensidad. Aunque la diferencia no es muy marcada, la dirección predominante es del NNE-NW. La mayor intensidad se registra entre 5.70 m/s-8.80 m/s y está dada fundamentalmente por los vientos del primer cuadrante, con muy bajas frecuencias. Según (IE, 2015), las mayores emisiones de PM_{2.5}, provienen de los municipios conurbados del Estado de México, sin embargo, una parte importante se genera en la ciudad ya que, las vialidades pavimentadas son una de las principales categorías de emisión de PM_{2.5}, al igual que los autobuses. En este mes aumenta el flujo vehicular debido al traslado de personas para festejar el día de las madres, por lo tanto, se genera un aumento de este contaminante.



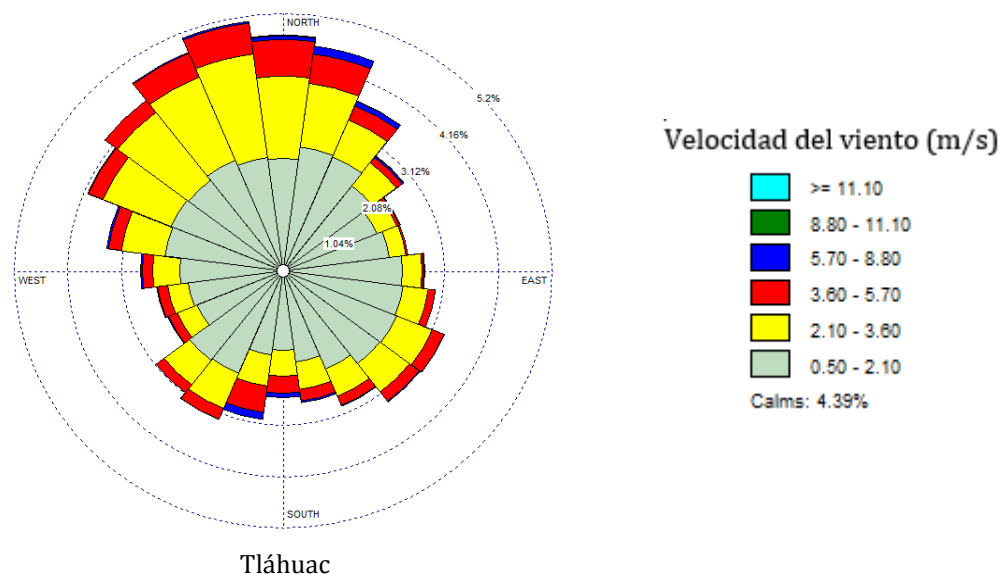


Figura 6.22 Rosas de viento para las estaciones Tlalnepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Tláhuac para el mes de mayo (Período 2008-2015).

Julio, es uno de los meses en que las concentraciones de PM_{10} / $PM_{2.5}$ alcanzan sus valores mínimos. En la figura 6.23 aparecen representadas las rosas de viento para todas las estaciones en cuestión. Nótese que en la estación de Tlalnepantla predominan los vientos de componente NNW, mientras en Xalostoc, la Merced y Pedregal son de componente NNE. Sin embargo, en esta última se observa una frecuencia importante de vientos provenientes del SW cuyas velocidades se encuentran en su mayoría entre los 0.50 m/s- 2.10 m/s y muy escasas entre 3.60 m/s- 5.70 m/s. En Xalostoc y la Merced la intensidad llega a alcanzar valores entre 5.70 m/s- 8.80 m/s en el 4% y 2 % de los casos aproximadamente. En el resto de las estaciones esta cifra es despreciable. Obsérvese que en las estaciones ubicadas al centro y sur (Merced/ Pedregal y Tláhuac) los vientos son más variables predominando los débiles. Las calmas son más frecuentes en Xalostoc y la merced.

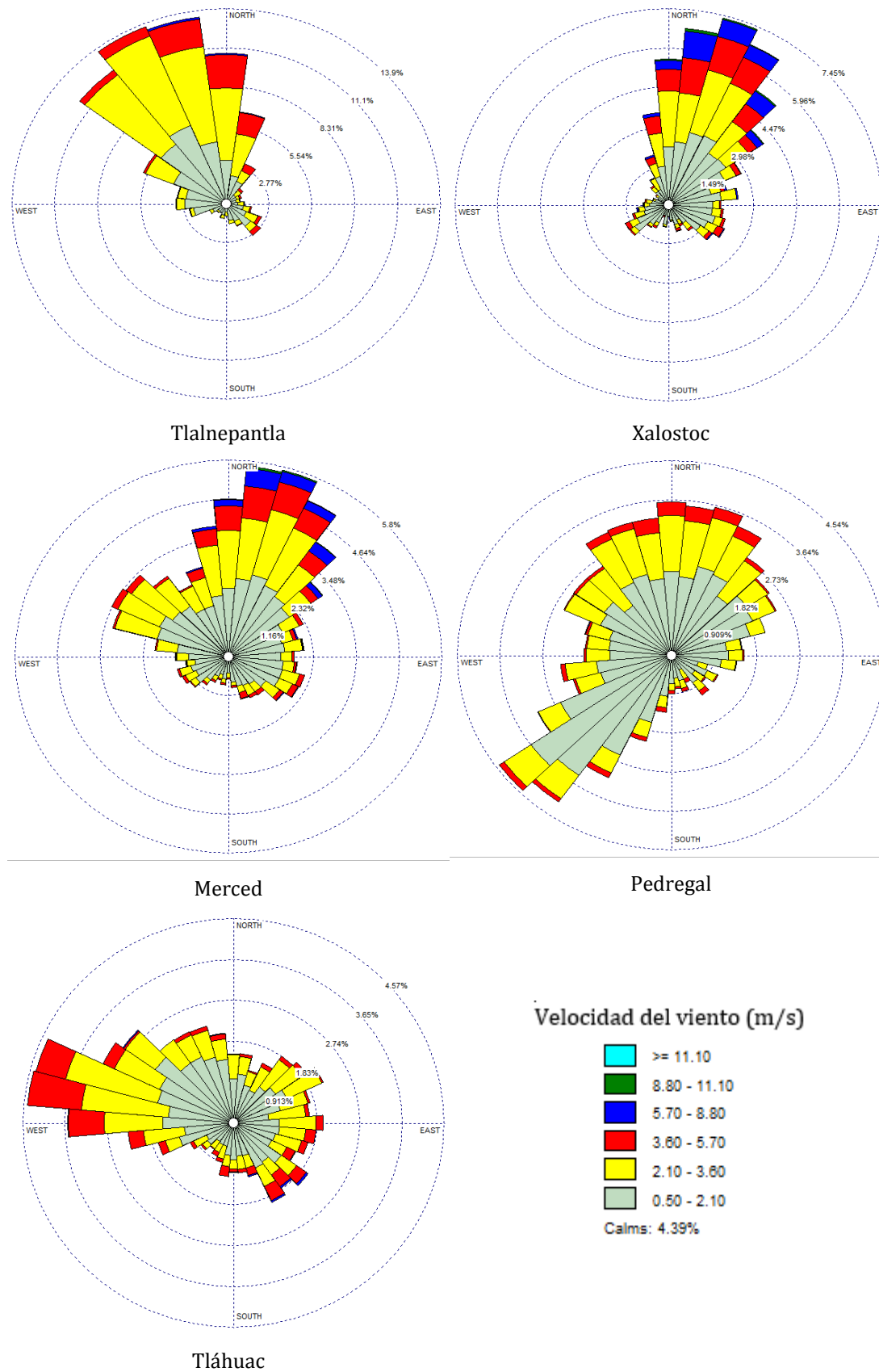
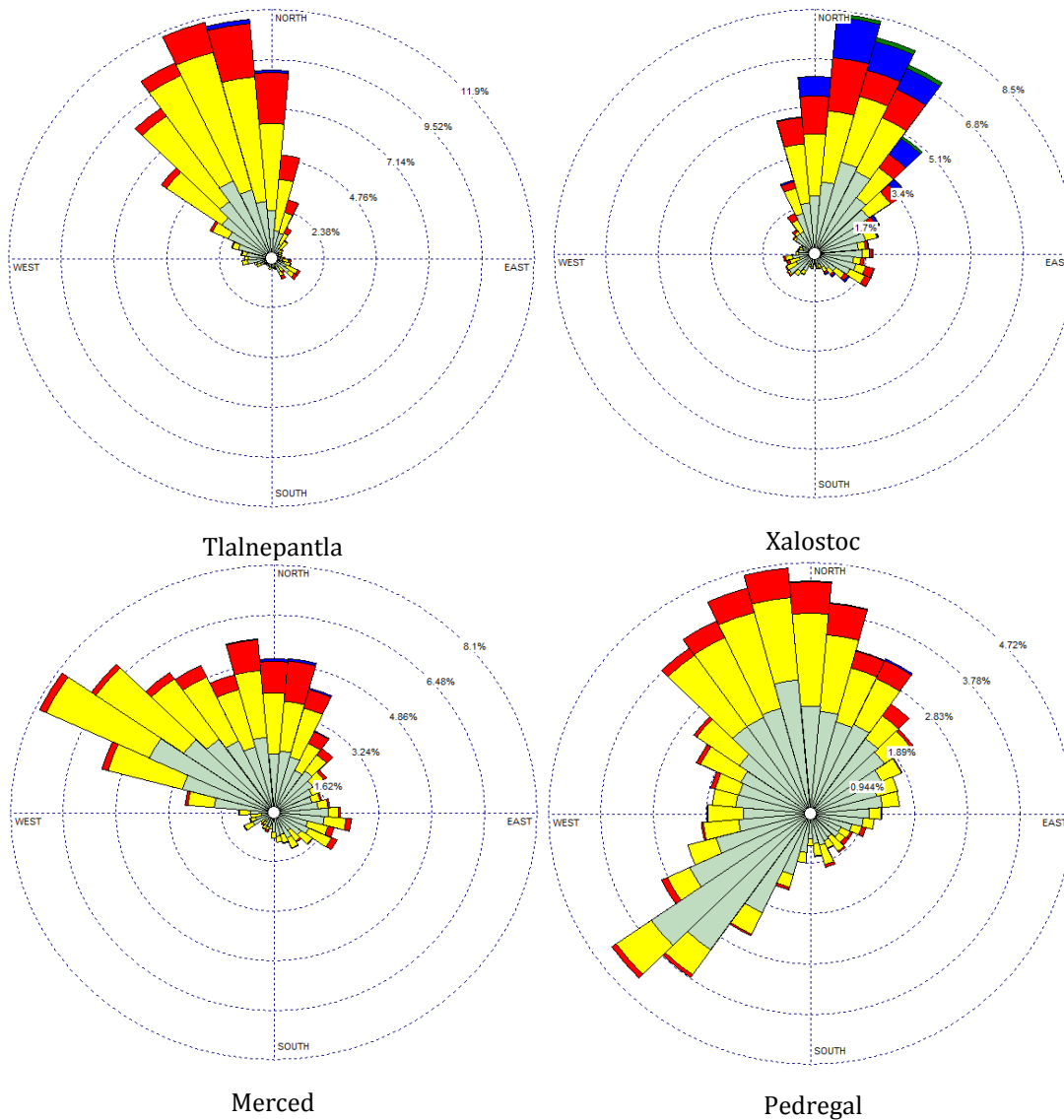


Figura 6.23 Rosas de viento para las estaciones Tlalnepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Tláhuac para el mes de julio. (Período 2008-2015).

A continuación están representadas las rosas de viento para el mes de agosto, segundo mes de concentraciones más bajas para PM_{10} y de valores mínimos para $PM_{2.5}$. Obsérvese que en Tlalnepantla, Xalostoc y Tláhuac el comportamiento es muy similar al de julio. En Xalostoc los vientos más fuertes aumentan su frecuencia en comparación con el mes anterior. En la Merced y Pedregal los vientos predominantes experimentan un giro de NNE a WNW y de NNE a NNW respectivamente. Mientras en la Merced los vientos más fuertes disminuyen su frecuencia (ver figuras 6.24), persiste en Pedregal una significativa contribución de vientos del SW (ver figura 6.24).



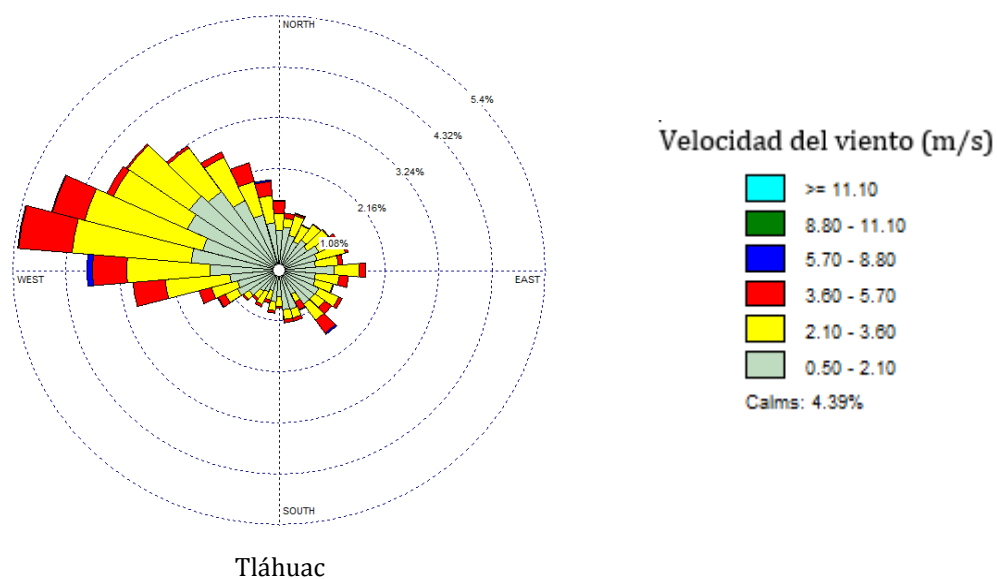
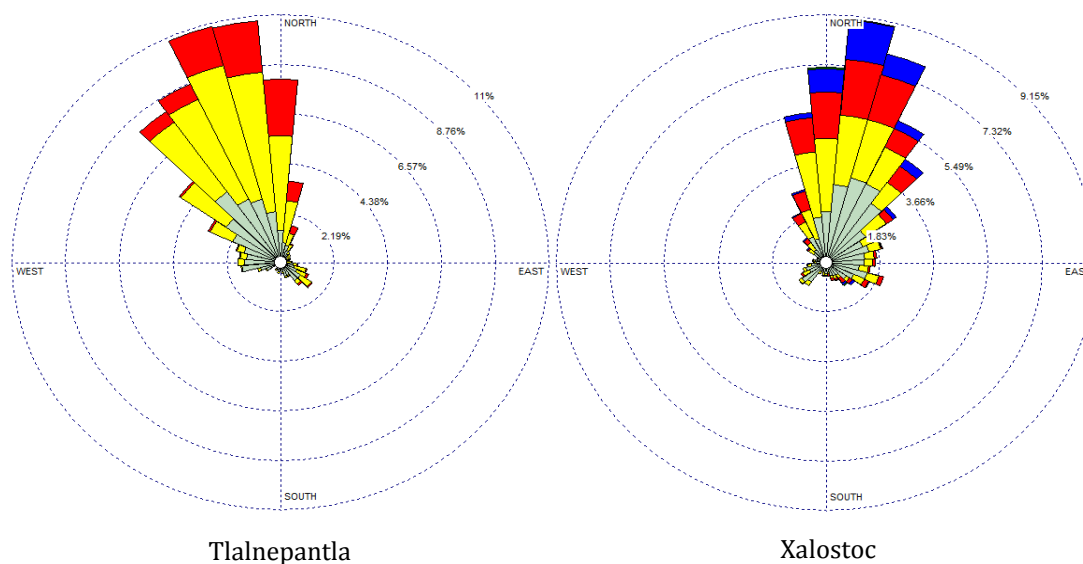


Figura 6.24 Rosas de viento para las estaciones Tlalnepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Tláhuac para el mes de agosto. (Período 2008-2015).

Obsérvese que durante septiembre las condiciones para Tlalnepantla, Xalostoc persisten y Tláhuac. Por el contrario, en Pedregal disminuyen los vientos de SW y aumenta la frecuencia de aquellos con componente NW. En Xalostoc los vientos fuertes disminuyen su frecuencia (ver figura 6.24).



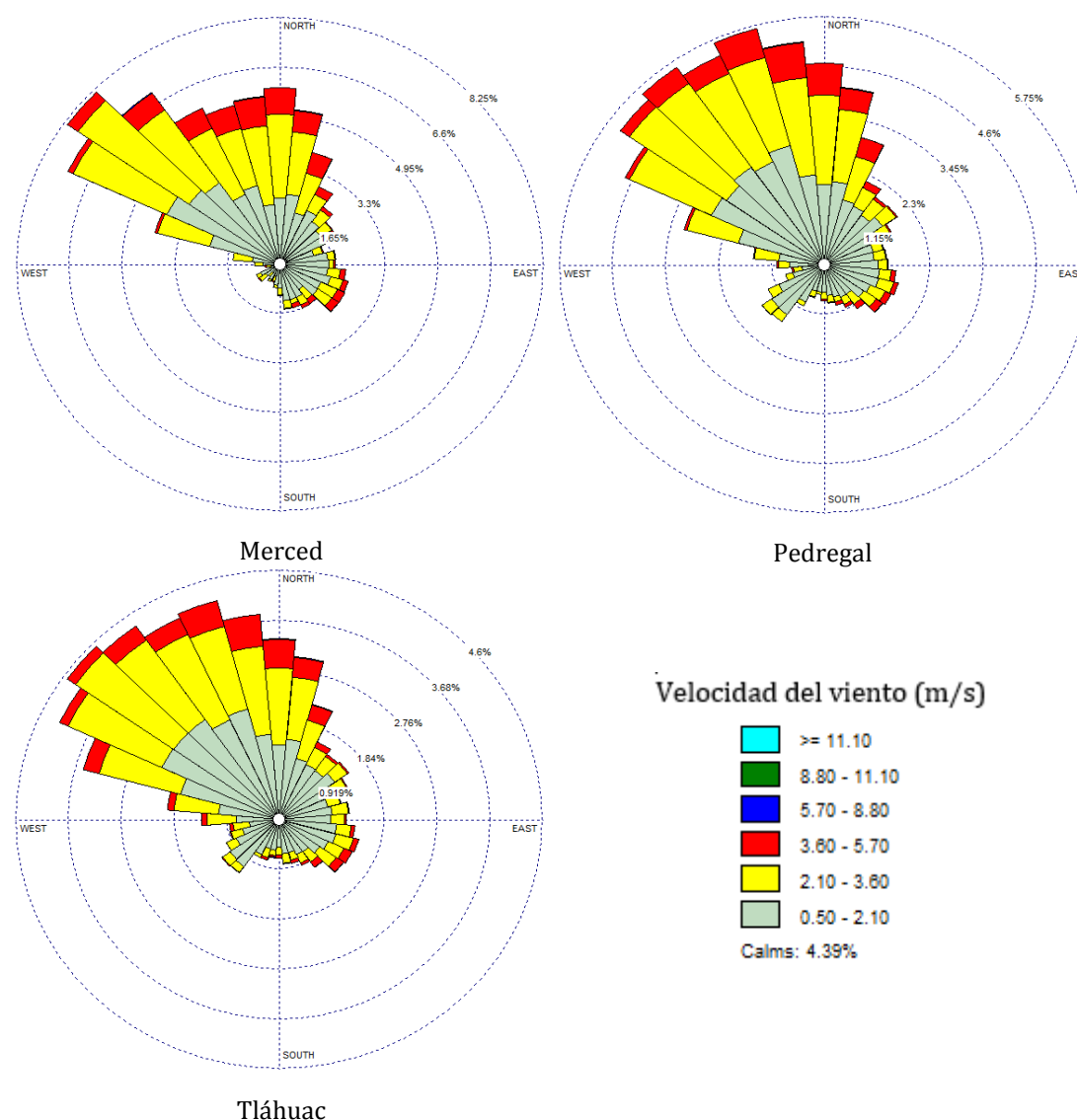


Figura 6.25 Rosas de viento para las estaciones Tlalnepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Tláhuac para el mes de septiembre. (Período 2008-2015).

Entre 8:00 y 10:00 de la mañana se presenta el primer y más alto pico del día de concentraciones de PM_{10} . En este horario la temperatura comienza a incrementarse y consecuentemente la velocidad del viento y la altura de la capa de mezcla. Esta situación debería ser inversa, sin embargo coincide con el inicio de las operaciones industriales por lo que el cambio en las concentraciones de este contaminante es abrupto (ver figura 6.26).

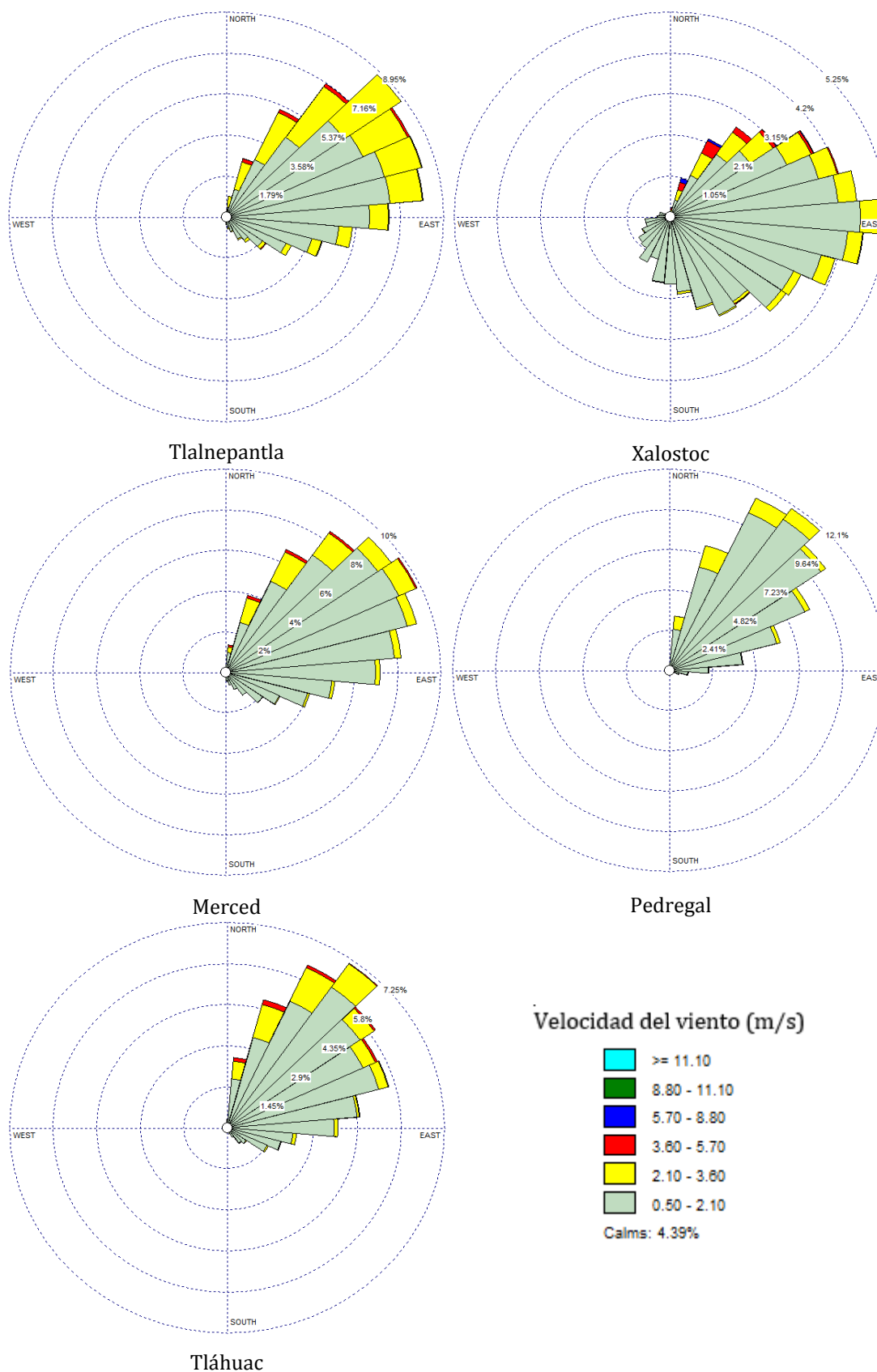
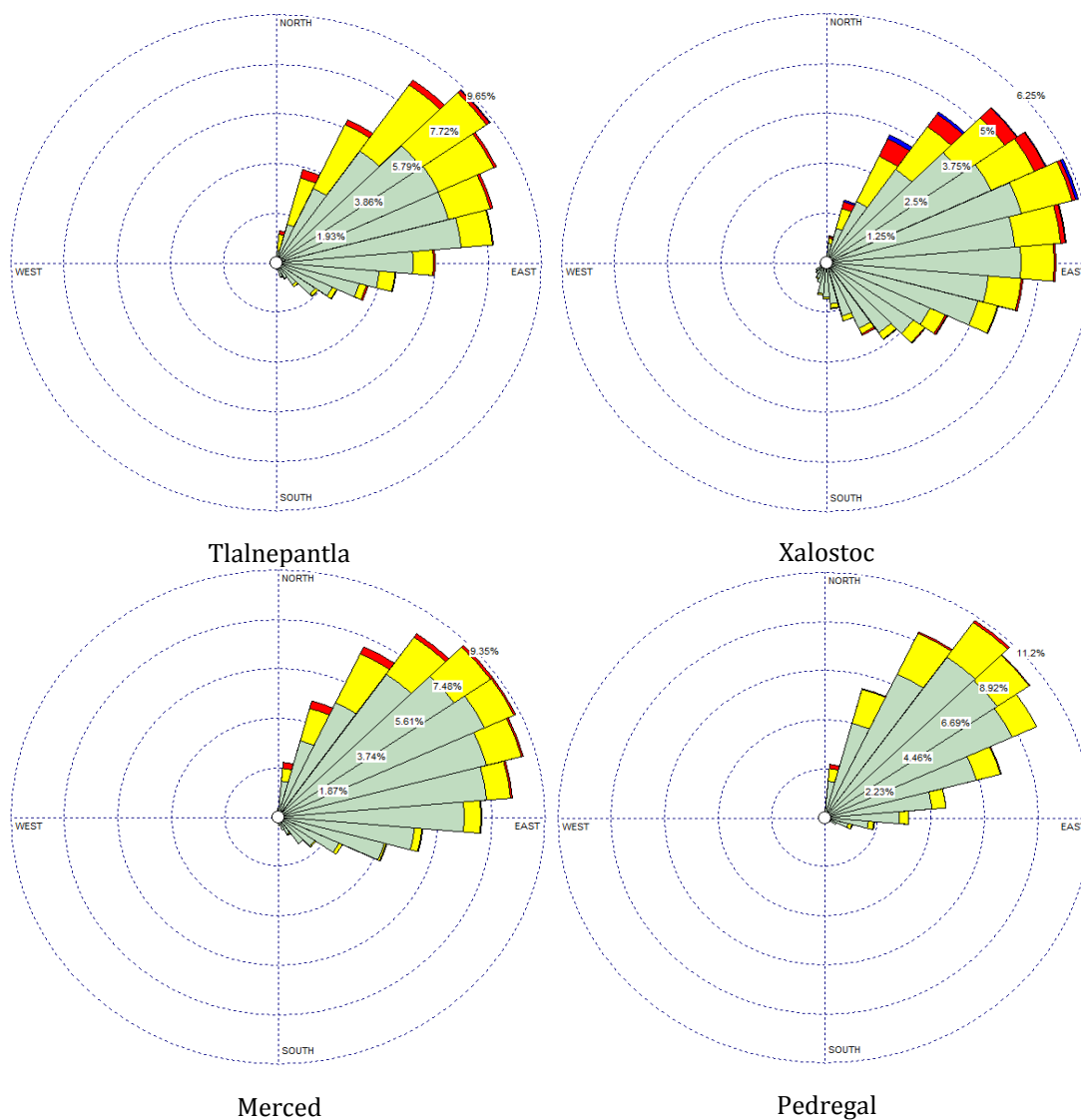


Figura 6.26 Rosas de viento para las estaciones Tlalnepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Tláhuac entre 8:00-10:00 horas. (Período 2008-2015).

Entre 10:00 y 12:00 ocurre lo mismo para la fracción $PM_{2.5}$. Como se puede observar (ver figura 6.26), el perfil de vientos no presenta cambios y durante las horas siguientes solo se observa una disminución.



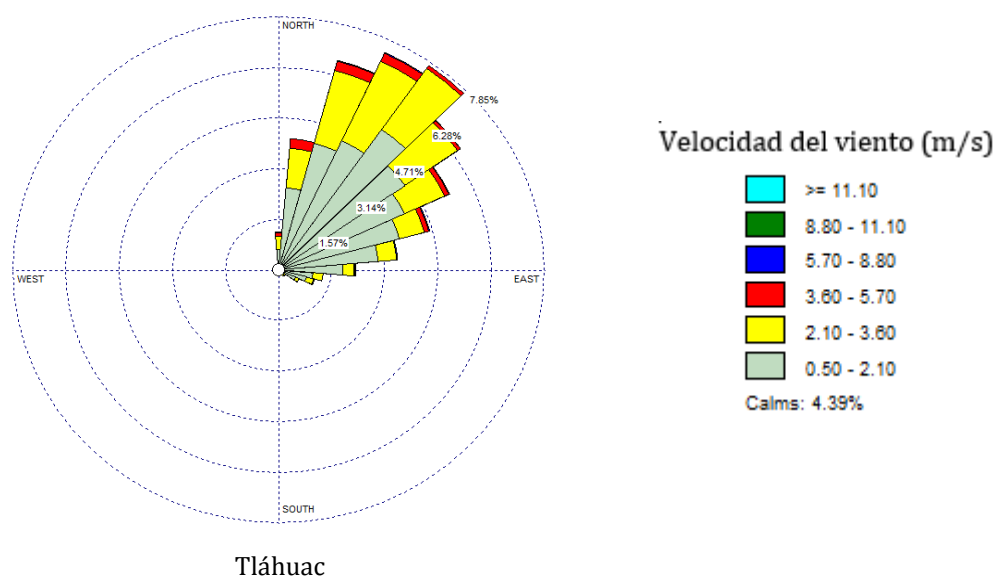


Figura 6.27 Rosas de viento para las estaciones Tlalnepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Tláhuac entre 10:00-12:00 horas. (Período 2008-2015).

Entre 12:00 y 14:00 horas se observa un descenso de la concentración para ambas fracciones, lo cual se atribuye al aumento de la altura de capa de mezcla. Ya a partir de 17:00 horas aumenta nuevamente la concentración de PM_{10} para alcanzar su segundo pico del día entre las 18:00-20:00 horas. Mientras, la de $PM_{2.5}$ continúa en descenso hasta alcanzarse los valores mínimos del día entre las 20:00-21:00 horas en las estaciones de Xalostoc y la Merced y entre las 2:00 y 4:00 de la madrugada en Tlalnepantla, Pedregal y Tláhuac. Este último, coincide con los mínimos de PM_{10} en las cinco estaciones analizadas. Note que según la figura.10, tanto la temperatura como la velocidad del viento y altura de la capa de mezcla son muy bajas. Note que en ambos periodos del día, en que se presentan los mínimos valores, el viento es predominantemente del NE (ver figuras 6.27 y 6.28).

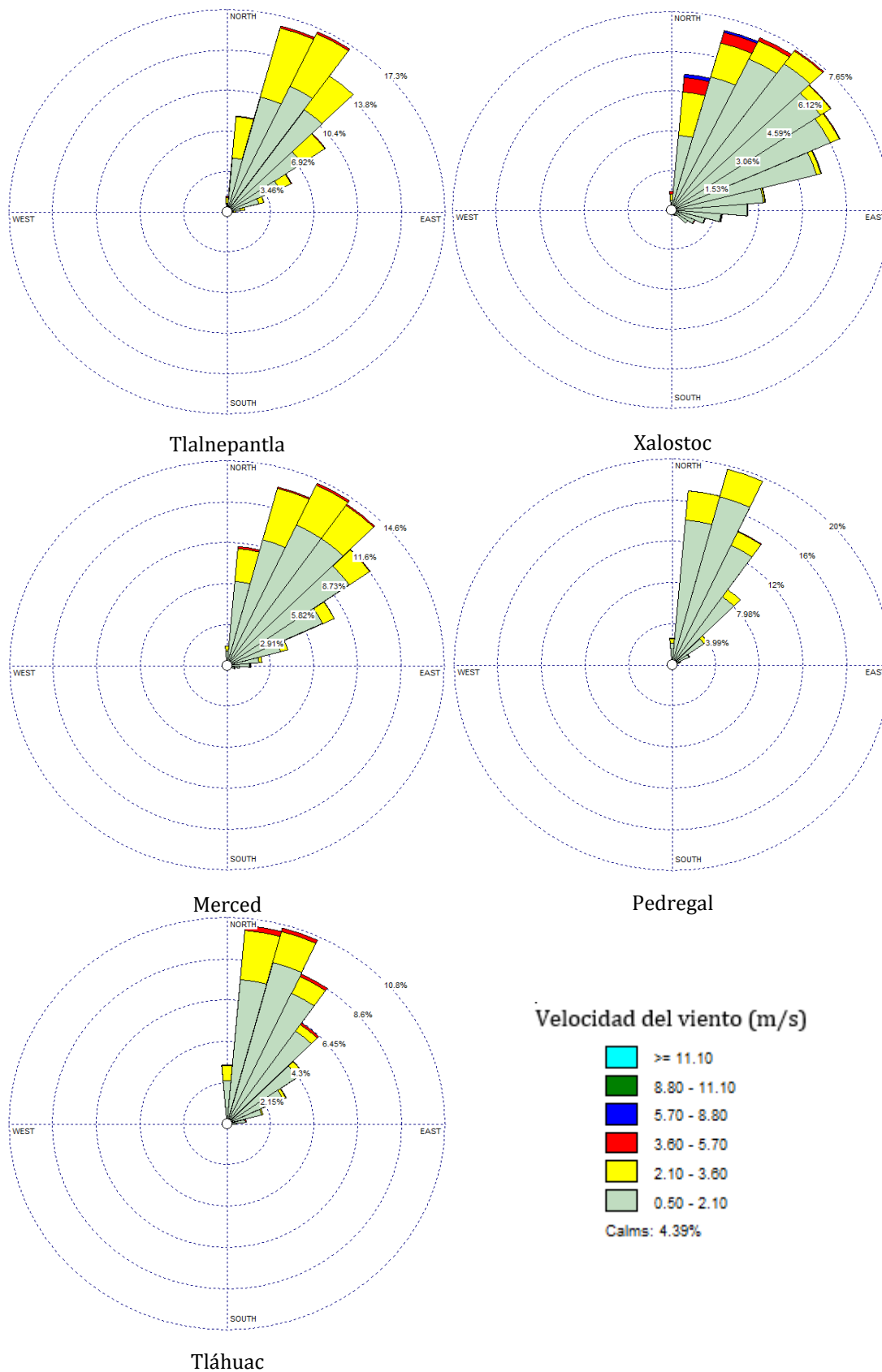


Figura 6.28 Rosas de viento para las estaciones Tlalnepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Tláhuac entre 02:00- 04:00 horas. (Período 2008-2015).

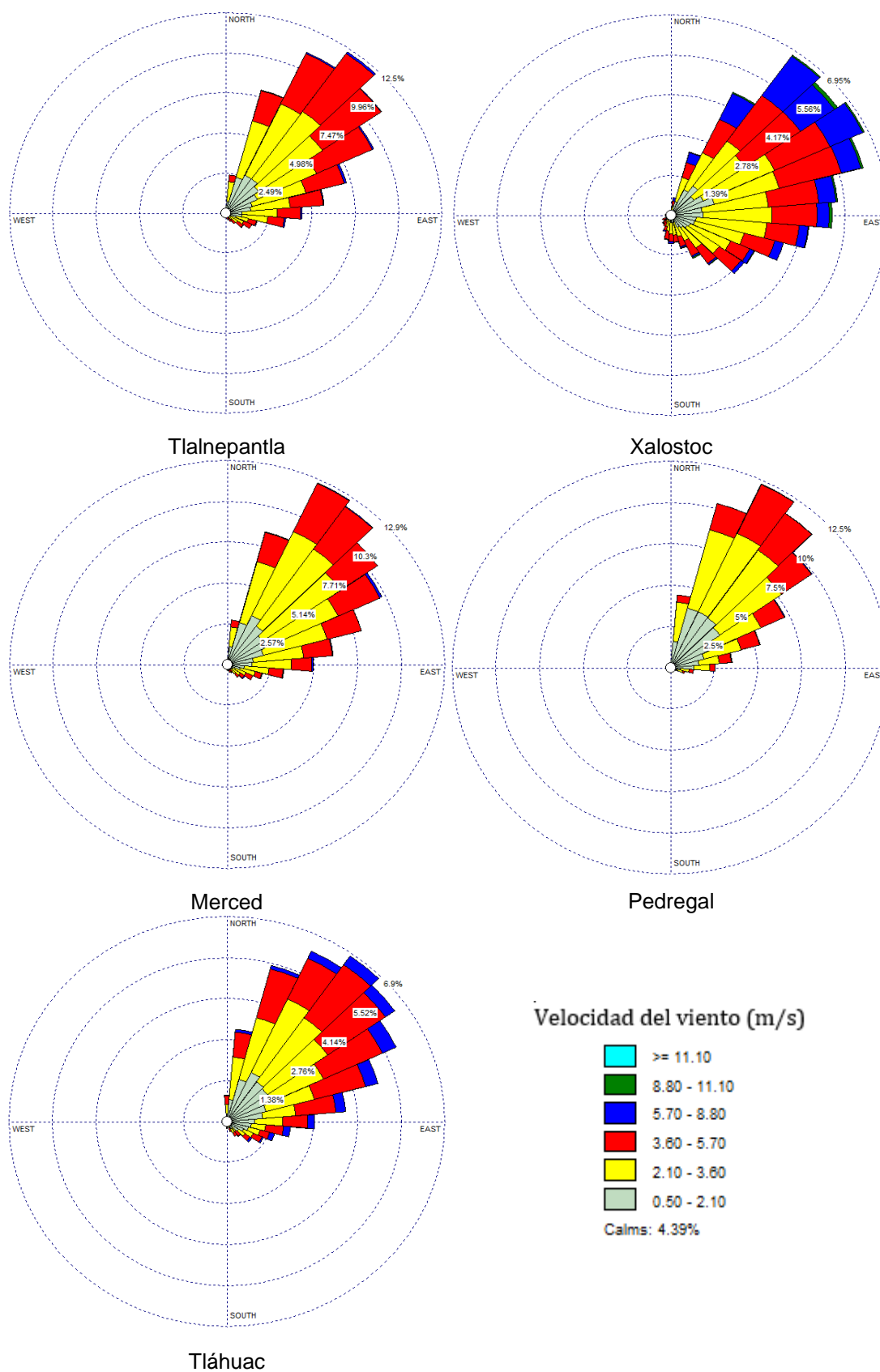


Figura 6.29 Rosas de viento para las estaciones Tlalnepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Tláhuac entre 18:00-20:00 horas. (Período 2008-2015).

Activación del Programa de Contingencias Ambientales Atmosféricas 2015.

De acuerdo con la información histórica obtenida a partir del monitoreo de la calidad del aire, se ha evidenciado un aumento de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante las celebraciones navideñas, con respecto a sus valores cotidianos. Según (SMA-GDF, 2017) estos eventos están relacionados con el aumento en el tránsito vehicular durante la víspera de Navidad y de Año Nuevo, y a la intensa quema de juegos de pirotecnia.

Sin embargo, las condiciones meteorológicas propias de la temporada invernal, que se caracterizan por una disminución de la temperatura, estabilidad atmosférica e inversiones térmicas de superficie, agravan estos episodios de contaminación.

Un ejemplo de ello es el evento ocurrido el 25 de diciembre de 2015, cuando se activó la fase de Precontingencia del PCAA. Según (SMA-GDF, 2017), la activación estuvo relacionada con la quema excesiva de juegos de pirotecnia durante las celebraciones de la Nochebuena y Navidad. La concentración de PM_{10} alcanzó un promedio móvil de $243 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que equivale a 161 puntos en el índice, este día se registró también una elevada concentración de $PM_{2.5}$ con un promedio móvil máximo de $128 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En la Figuras 6.29 y 6.30 se muestra la evolución de la concentración horaria de PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante los días 24 a 27 de diciembre. Obsérvese que después de la noche del 24 se presentó un abrupto incremento de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$, alcanzándose valores máximos de 305 y 211 respectivamente, a las 3:00 en la estación Xalostoc. A partir de este momento, las concentraciones comenzaron a disminuir paulatinamente y; a las 9:00 se presentó nuevamente un incremento con un valor de 344 para PM_{10} y 252 para $PM_{2.5}$ en la estación Xalostoc.

De acuerdo con (SMA-GDF, 2017), este segundo pico fue provocado por el arrastre de contaminantes hacia el centro y sur, además de la posible contribución de aerosoles secundarios. El resto del día se observó una dispersión gradual de la contaminación atmosférica ya que comenzaron a restablecerse las condiciones meteorológicas. El día 26 estas condiciones continuaron imponiéndose,

favoreciendo así la dispersión por lo que se suspendió la Fase de Precontingencia (SMA-GDF, 2017).

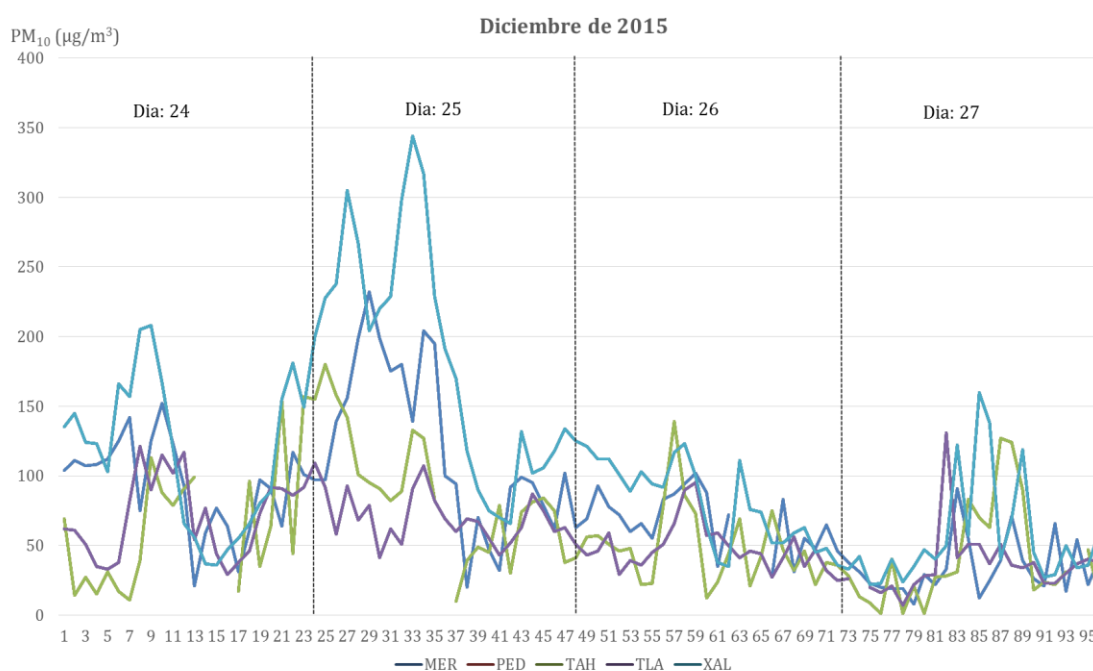


Figura 6.30 Episodio de activación del Programa de Contingencias Ambientales para las estaciones Pedregal, Tlalnepantla, Tláhuac, Xalostoc y Merced (Diciembre 2015)

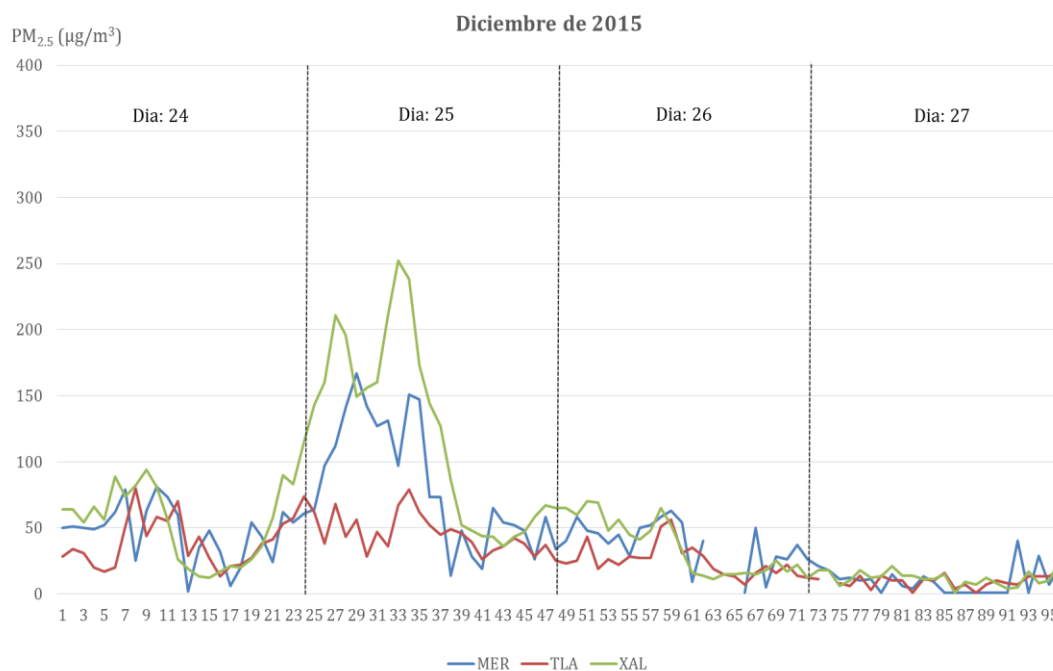


Figura 6.31 Episodio de activación del Programa de Contingencias Ambientales para las estaciones Merced, Tlalnepantla y Xalostoc (Diciembre 2015).

En las figuras 6.31 y 6.32 se puede observar el comportamiento horario de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ entre los días 11 y 18 de marzo de 2016. Nótese que aun cuando el Programa de Contingencias Ambientales fue activado por Ozono, las partículas mostraron un ascenso significativo en sus concentraciones que persistió durante varios días debido a la falta de dispersión, la subsidencia y a la intensa radiación solar que caracterizan los sistemas anticiclónicos.

Según (SMA-GDF, 2017), como consecuencia del viento moderado a fuerte asociado a la corriente de chorro subtropical entre el 8 y 11 de marzo, la Ciudad de México experimentó una condición de calidad del aire inmejorable. El desplazamiento de la corriente de chorro hacia latitudes superiores fue seguido por el desarrollo de un sistema de altas presiones que afectó durante casi seis días consecutivos la región central del país, provocando un severo episodio de contaminación por ozono que inició el sábado 12 de marzo con la activación de la Fase de Precontingencia.

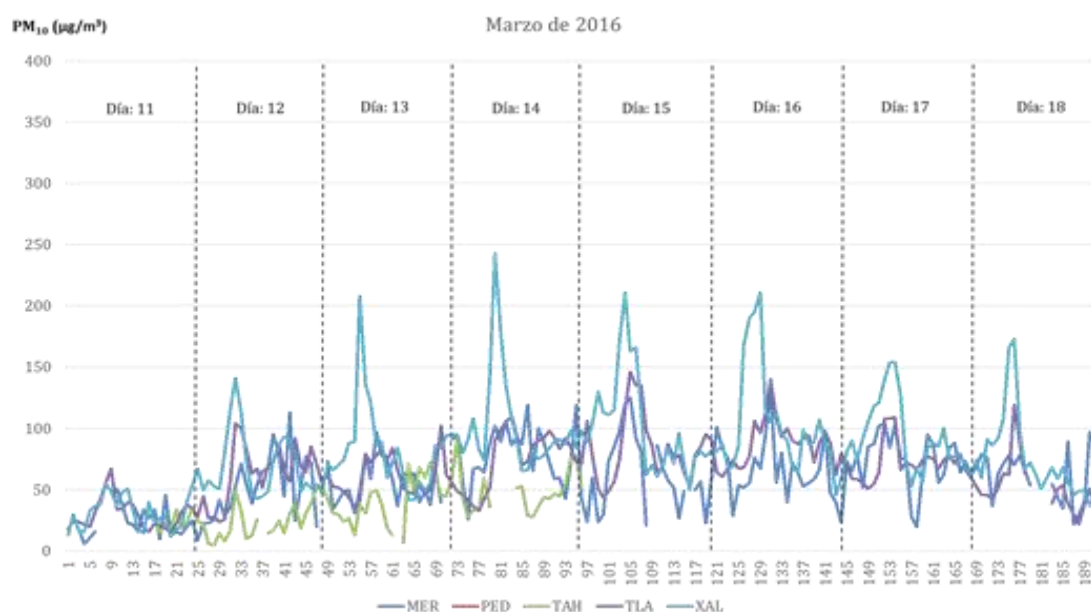


Figura 6.32 Escenario de PM_{10} durante la activación del Programa de Contingencias Ambientales por Ozono, para las estaciones Pedregal, Tlalneantla, Tláhuac, Xalostoc y Merced (Marzo 2016).

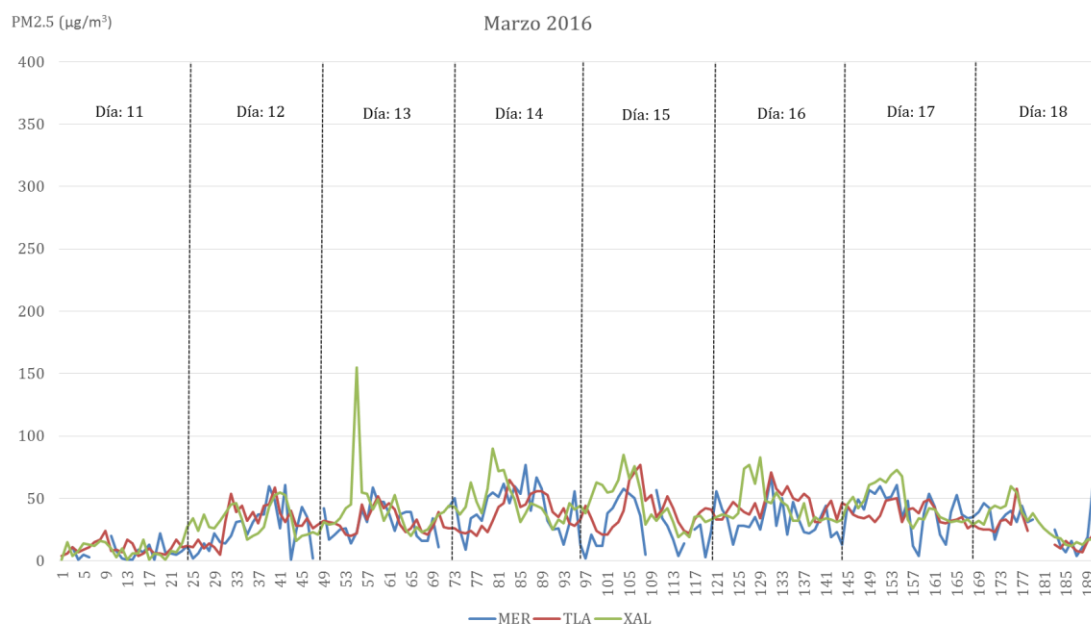


Figura 6.33 Escenario de PM2.5 durante la activación del Programa de Contingencias Ambientales por Ozono, para las estaciones Merced, Tlalnepanitla y Xalostoc (Marzo 2016).

6.13 Resumen de los Resultados

Como es conocido, el impacto de las partículas suspendidas en la calidad del aire es, casi siempre, negativo. En ocasiones es insignificante y en otras no tanto y, se recibe, según su comportamiento, bajo las siguientes condiciones:

Multianual:

En el comportamiento multianual se observa que el perfil de las partículas no se asocia al de las variables meteorológicas en cuestión, ya que, para grandes escalas de tiempo, la variación de las partículas, no responde a las variables meteorológicas estudiadas.

Anual:

Según el comportamiento anual se observa que la fracción PM₁₀ presenta sus valores máximos en los meses de diciembre y enero para Xalostoc y Merced, y en diciembre y abril para Tlalnepanitla, Pedregal y Tláhuac. Este comportamiento guarda cierta relación con la dirección del viento y aunque no directamente con la velocidad, se puede asumir que esta interviene. En diciembre, aunque el viento predominante es del ESE, se observa una frecuencia importante del NE con

velocidades que superan los 5.70 m/s. Esto favorece el traslado de partículas desde el Estado de México, el cual sobresale por las emisiones de vialidades sin pavimentar, actividades de labranza y cosecha, debido a que tienen una mayor superficie agrícola. Por otra parte, el viento varía mucho en cuanto a dirección, lo cual produce circulaciones locales concentrando así a las partículas.

En el mes de enero el comportamiento es similar, sin embargo solo para Xalostoc y Merced, este representa el segundo mes de mayor concentración y se debe a que solo para dichas estaciones, una fracción significativa del viento supera los 5.70 m/s favoreciendo de igual manera el transporte de partículas desde el Estado de México. Por otra parte, en el anexo 8 se observa que, aunque el número de inversiones térmicas es menor en diciembre que en enero, las concentraciones de PM₁₀/ PM_{2.5} son mayores en diciembre. Esto puede deberse en mayor medida a la quema excesiva de juegos de pirotecnia durante las celebraciones de la Nochebuena y Navidad.

Abril, es el segundo mes de mayor concentración para el resto de las estaciones (Tlalnepantla, Pedregal y Tláhuac). Note que en estas, el viento es, en su mayoría débil y muy variable. Presenta una confluencia de vientos totalmente opuestos (NNE y SSW), con magnitudes similares, provocando un ligero estancamiento.

Para el caso de PM_{2.5} se observa que después de diciembre y enero, el siguiente mes de mayor concentración es mayo. Este comportamiento se explica a partir de que la dirección predominante es del NNE-NNW. La mayor intensidad está dada fundamentalmente por los vientos del primer cuadrante. Según (IE, 2014), las mayores emisiones de PM_{2.5} , provienen de los municipios conurbados del Estado de México, sin embargo, una parte importante se genera en la ciudad ya que, las vialidades pavimentadas son una de las principales categorías de emisión de PM_{2.5}, al igual que los autobuses.

En este mes aumenta el flujo vehicular debido al traslado de personas para festejar el día de las madres, por lo tanto, se genera un aumento de este contaminante.

Diario:

A partir de las 7 de la mañana, la temperatura inicia su ascenso y la capa de mezcla comienza a aumentar su altura. Bajo estas condiciones, lo natural sería un descenso de las concentraciones de PM_{10} / $PM_{2.5}$ ya que son favorables para la dispersión. Sin embargo, comienza a percibirse un aumento de las concentraciones de PM_{10} / $PM_{2.5}$. En este horario, aumenta el flujo vehicular ya que las personas comienzan su traslado hacia los centros de trabajo y horas más tarde, cuando el tráfico se ha descongestionado, inician las operaciones industriales. A estos eventos se asocia el aumento de PM_{10} / $PM_{2.5}$ que alcanza su máximo valor sobre las 9 de la mañana. A partir de este momento se observa una tendencia a la disminución de las concentraciones de PM_{10} / $PM_{2.5}$, y justamente coincide con momento en que el viento comienza a aumentar su intensidad, por lo que se puede asumir que actúa como regulador de la concentración de PM_{10} / $PM_{2.5}$. Obsérvese que la tendencia a la disminución ocurre hasta las 14:00 horas aproximadamente, momento en que la capa de mezcla alcanza su máximo valor.

El segundo pico de PM_{10} ocurre entre 18:00- 20:00 horas y, aunque coincide con el máximo de velocidad del viento y una altura de capa de mezclado aun favorable para la adecuada dispersión, por lo que teóricamente, la concentración debería ser mínima, ocurre un ascenso de las concentraciones de PM_{10} . En este horario el flujo vehicular aumenta debido a la culminación de las labores diarias en la mayoría de los centros de trabajo y como las vialidades pavimentadas y sin pavimentar son las categorías de mayor emisión, se generan partículas debido a la resuspensión de polvo durante el paso vehicular.

Este pico es un poco menos pronunciado que el primero y se asocia con que horas antes la capa de mezcla ha tomado su altura máxima por lo que ha ocurrido una dispersión de las partículas y como se ha dicho antes, la velocidad del viento alcanza su valor máximo y amortigua el contraste ocasionado.

Durante la noche y madrugada, cuando se conoce que la temperatura desciende gradualmente, que la capa de mezcla permanece casi invariable con una altura mínima y que los vientos son débiles, es justamente cuando se registran los valores mínimos del día para ambas fracciones. Esto confirma la idea de que el curso diario de las partículas está determinado por la actividad humana y que las condiciones meteorológicas solo moderan su comportamiento. Solo en las estaciones de Xalostoc y la Merced, los valores mínimos de $PM_{2.5}$ ocurren entre las 20:00- 21:00 horas. Esto se asocia al hecho de que la dirección predominante de los vientos en ese horario es del NE solo para las estaciones antes mencionadas y es justamente esta componente la de mayor intensidad (5.70-8.80 m/s). Para las estaciones Tlalnepantla, Pedregal y Tláhuac, la dirección predominante es de, NNW, SW y WNW respectivamente y la intensidad solo supera los 5.70 m/s en Tláhuac para una frecuencia de ocurrencia muy baja (ver anexos 2 y 3).

6.14 Medidas Propuestas

Se sugiere controlar la práctica de quema de juegos pirotécnicos durante los meses de diciembre y enero, ya que estos meses muestran un ascenso significativo en las concentraciones de partículas, sobre todo en las de PM_{10} . Se impone además la presencia de masas de aire subsidentes que producen una disminución en los valores de temperatura y velocidad del viento, provocando un descenso importante en la altura de la capa de mezcla. Como consecuencia, estas condiciones impiden la adecuada dispersión de los contaminantes, dando lugar a severos episodios de contaminación por partículas suspendidas.

Poner especial atención durante el último periodo de la temporada seca ya que las vialidades no pavimentadas y; en general los suelos, se encuentran erosionados; además, el viento impone su componente norte y por ende se ve favorecida la resuspensión de polvo a la atmósfera.

Disminuir, para el mes de mayo, las actividades de la construcción, actividades en el sector químico y la fabricación de productos a base de minerales no metálicos (cementerías, concreteras, caleras, otros), tanto en la ciudad como en los municipios conurbanos, o bien reforzar las medidas de control. Según (IE, 2015), aunque una

parte importante de las emisiones de PM_{2.5} se genera en la ciudad, las mayores, provienen de los municipios conurbados del Estado de México. La dirección predominante durante este es del NNE-NNW. La mayor intensidad está dada fundamentalmente por los vientos del primer cuadrante que en ocasiones alcanzan velocidades entre 5.70 m/s y 8.80 m/s.

Disminuir las operaciones industriales en horas de la mañana cuando las condiciones de dispersión son desfavorables, tales como, vientos débiles y baja altura de capa de mezcla.

Reforestar las áreas deterioradas con vocación forestal que rodean la ciudad y proteger las ya existentes, así como detener la expansión de la zona urbana.

Fomentar los programas de capacitación con el fin de aumentar la consciencia de la población sobre los problemas ambientales actuales, así como para poder contar con un número suficiente de recursos humanos que permita difundir los conocimientos y cooperar con la aplicación de los programas.

*Toda medida debe ser acompañada de un estudio de factibilidad económica.

CAPITULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- Primeramente se identificaron patrones de comportamiento de PM_{10} y $PM_{2.5}$ sobre su variación espacial y temporal. Para el caso de PM_{10} un período de altas concentraciones que va desde noviembre hasta abril. Luego otro periodo con concentraciones más bajas desde mayo hasta octubre. Para $PM_{2.5}$ un periodo de altas concentraciones desde noviembre hasta mayo; seguido por uno de concentraciones más bajas desde junio hasta octubre. Se identificó para PM_{10} un patrón diario uniforme que comienza con bajas concentraciones en las primeras horas de la madrugada, seguido por dos picos máximos, al final de la mañana y de la tarde respectivamente. Para $PM_{2.5}$ solo se observa un pico máximo al final de la mañana, seguido de un gradual descenso el resto del día.
- Después del cálculo de correlación entre los promedios anuales, mensuales y horarios de $PM_{10}/ PM_{2.5}$ con los promedios respectivos de las variables meteorológicas estudiadas se concluyó que, existe una mejor relación con la velocidad del viento.
- Luego se compararon los patrones espaciales y temporales de las partículas con los de las variables meteorológicas y se concluyó que el patrón anual de velocidad y dirección del viento determinan el comportamiento anual de ambas fracciones durante su temporada alta. En la temporada baja, las concentraciones de PM_{10} obedecen más a la precipitación, mientras, las de $PM_{2.5}$ se rigen por aumentos en la velocidad del viento y en las frecuencias de componente N. La variabilidad horaria de PM_{10} no obedece a los patrones diarios de dichas variables meteorológicas y tampoco a la variación de la altura de la capa de mezcla.
- Finalmente se concluye que el impacto en la calidad del aire por partículas suspendidas, en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México es negativo durante todo el año. Sin embargo, es mayor entre diciembre y mayo por lo que las acciones de prevención, minimización y control deben ser más rigurosas durante este periodo.
- Se acepta la hipótesis nula (H_0)

7.2 Recomendaciones

- Hacer un análisis meteorológico en el que, en lugar de analizar puntualmente las variables, se consideren procesos como: advección, estabilidad atmosférica, efectos de Isla de Calor, lavado atmosférico de partículas por lluvia.
- Determinar con mayor precisión, los intervalos de velocidades de viento, a partir de los cuales, la concentración de partículas aumenta o disminuye significativamente.
- Considerar la contribución de partículas secundarias por su importante contribución en la fracción $PM_{2.5}$.
- Ampliar las mediciones de precipitación de la REDDA en cuanto a número de estación e intervalo de medición ya que, es una variable discreta que puede variar mucho de una estación meteorológica a otra y; respecto a una misma estación, su variación temporal es abrupta.
- Promover investigaciones en las que se determinen los sistemas sinópticos típicos por temporadas, a los cuales, se expone periódicamente el territorio nacional. Con ello quedarían determinado los patrones sinópticos de circulación lo que facilitaría los estudios locales.

CAPÍTULO VIII. REFERENCIAS

- Arellano, M. (2001): "Introducción al Análisis Clásico de Series de Tiempo"
- Bencardino, M.C. 1998. Estadística Comercial. Ecoe Ediciones. Bogotá. Colombia.
- Bravo A.H., Báez A.P., S. Lares (1960). Estudio del depósito de polvo por gravedad en la Ciudad de México. Revista de Ingeniería Química.
- CAI, 2013. La Calidad del Aire en América Latina: Una Visión Panorámica. EUA, Washington D.C.
- Brook, R. D.; Rajagopalan, S.; Pope, C. A. III; Brook, J. R.; Bhatnagar, A.; Diez-Roux, A. V.; Holguin, F.; Hong, Y.; Luepker, R. V.; Mittleman M. A.; Peters, A.; Siscovick, D.; Smith, S. C. Jr.; Whitsel, L.; Kaufman J. D.; American Heart Association Council on Epidemiology and Prevention, Council on the Kidney in Cardiovascular Disease, and Council on Nutrition, Physical Activity and Metabolism. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation* 121: 2331–2378.
- Cai, Y.; Zhang, B.; Ke, W.; Feng, B.; Lin, H.; Xiao, J.; Zeng, W.; Li, X.; Tao, J.; Yang, Z.; Ma, W.; Liu, T. (2016). *Epidemiology/Population*. Hypertension, 68, 62-70.
- Calderón, I., Mora, A., Sánchez, GM., Rodríguez, J., Torres, R., Styner, M., Mukherjee, PS., Lin, W., Jewells, V. "A Critical Proton MR Spectroscopy Marker of Alzheimer's Disease Early Neurodegenerative Change: Low Hippocampal NAA/Cr Ratio Impacts APOEw4 Mexico City Children and Their Parents" *Journal of Alzheimers Disease*. 2015: 1-11.
- Canter, L. and B. Sadler. 1997. A tool kit for effective EIA practice-Review of methods and perspectives on their application. A supplementary report of the international study of the effectiveness of environmental assessment. En: Environmental and Ground Water Institute. University of Oklahoma, USA, Institute of Environmental Assessment. UK; International Association for Impact Assessment, http://www.eiatraining.com/A_Tool_Kit_for_Effective_EIA_Practice.pdf. 148 p.
- Carmona, MC., 2003. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Comentarios y concordancias. Capítulo II.
- CEPIS, 2005. Conceptos básicos sobre meteorología de la contaminación del aire, Manual de Auto-instrucción.

- CEMDA, 2017. Recomendaciones de política pública para mejorar la calidad del aire en México.
- Centro Mario Molina (CMM), 2015. Plan Integral de Calidad del Aire, Beneficios sociales por mejorar la calidad del aire en México: impactos a la salud y su valoración económica.
- COFEPRIS/ DIGESA, 2002. Primer diagnóstico nacional de salud ambiental y ocupacional. Sección II. Aire.
- DGCEA/CSIC, 2002. Estudio y evaluación de la contaminación atmosférica por material particulado en España y de las necesidades derivadas de la Directiva del Consejo relativa a partículas PM₁₀ y PM_{2.5}.
- Eiguren-Fernandez, A.; Di Stefano, E.; Schmitz, D. A.; Guarieiro, A. L. N.; Salinas, E. M.; Nasser, E.; Froines, J. R.; Cho, A. K. (2015) Chemical reactivities of ambient air samples in three Southern California communities. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 65(3), pp. 270–277.
- Figueras, M.S., Gargallo, P. 2003. Análisis Exploratorio de Datos.
- Foy, B., Caetano, E., Magaña, V., Zitacuaro, A., Cárdenas, C., Retama, A., Ramos, R., Molina, L.T., and Molina, M.J. 2005. Mexico City basin wind circulation during the MCMA-2003 field campaign.
- García, M., Ramírez, H., Ulloa, H., Arias, S., and Pérez A. 2012. Las inversiones térmicas y la contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana de Guadalajara (México).
- Gómez, J.C. 2002. Análisis de correlación. Universidad Nacional de Rosario.
- Goldemberg, J., Johansson, T. B., Reddy, A. K and Williams, R. H.1987. Energy for a Sustainable World. University of São Paulo.
- Fernández, P. S., Pértega, D. S. 2001. Relación entre variables cuantitativas. Unidad de epidemiología clínica y bioestadística.
- IDEAM. 2004. Guía para la auditoría a redes automáticas de monitoreo de calidad del aire.
- INE-SEMARNAT, 2005. Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones. Primera edición, Mayo 2005, México.
- INECC, 2014. Valoración económica de los beneficios en la salud de la población que se alcanzarían por la reducción de las PM_{2.5} en tres zonas metropolitanas mexicanas.

- http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgicur/2014_pm2.5_ccsa_inecc.pdf
- INEGI, 1999. Estadísticas del medio ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana.
- INEGI, 2005. Estadísticas del medio ambiente del Distrito Federal y zona metropolitana 2002.
- James D. Hamiltos.1995. Time Series Analysis. Princeton University Press. Princeton, New Jersey.
- Jure y Rodríguez. 1997. Aplicabilidad del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental a los Planos Reguladores Comunales. Informe para optar al Título de Ingeniero de Ejecución en Ordenación Ambiental, Instituto Profesional INACAP.
- Korc, M. E.1999. Conceptos básicos sobre meteorología de la contaminación del aire. Lima.
- Lu, F., Xu, D., Cheng, Y., Dong, S., Guo, C., Jiang, X., Zheng, X. (2015). Systematic review and meta-analysis of the adverse health effects of ambient PM2. 5 and PM10 pollution in the Chinese population. Environmental Research, 136, 196-204.
- Lutgens, F.K. & Tarbuck, E.J. 2010. The Atmosphere: An Introduction to Meteorology. Pearson Prentice Hall.
- Molina M., and Molina L. 2004. Proyecto para el Diseño de una Estrategia Integral de Gestión de la Calidad del Aire en el Valle de México.
- OMS, 2013. Afrontar el reto mundial de garantizar un aire limpio. Comunicado de prensa, 26 de septiembre de 2011, Ginebra, Suiza. Disponible en: www.who.int/mediacentre/news/releases/2011/air_pollution_20110926/es/ Consultado el 20 de junio de 2013.
- Rio de Janeiro.
- ONU, 2002. Informe de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible. Johannesburgo (Sudáfrica).
- PICCA, 1990. Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.
- PICCA, 1996. Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México, 1995-2000.
- PICCA, 2001. Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. 2002-2010.

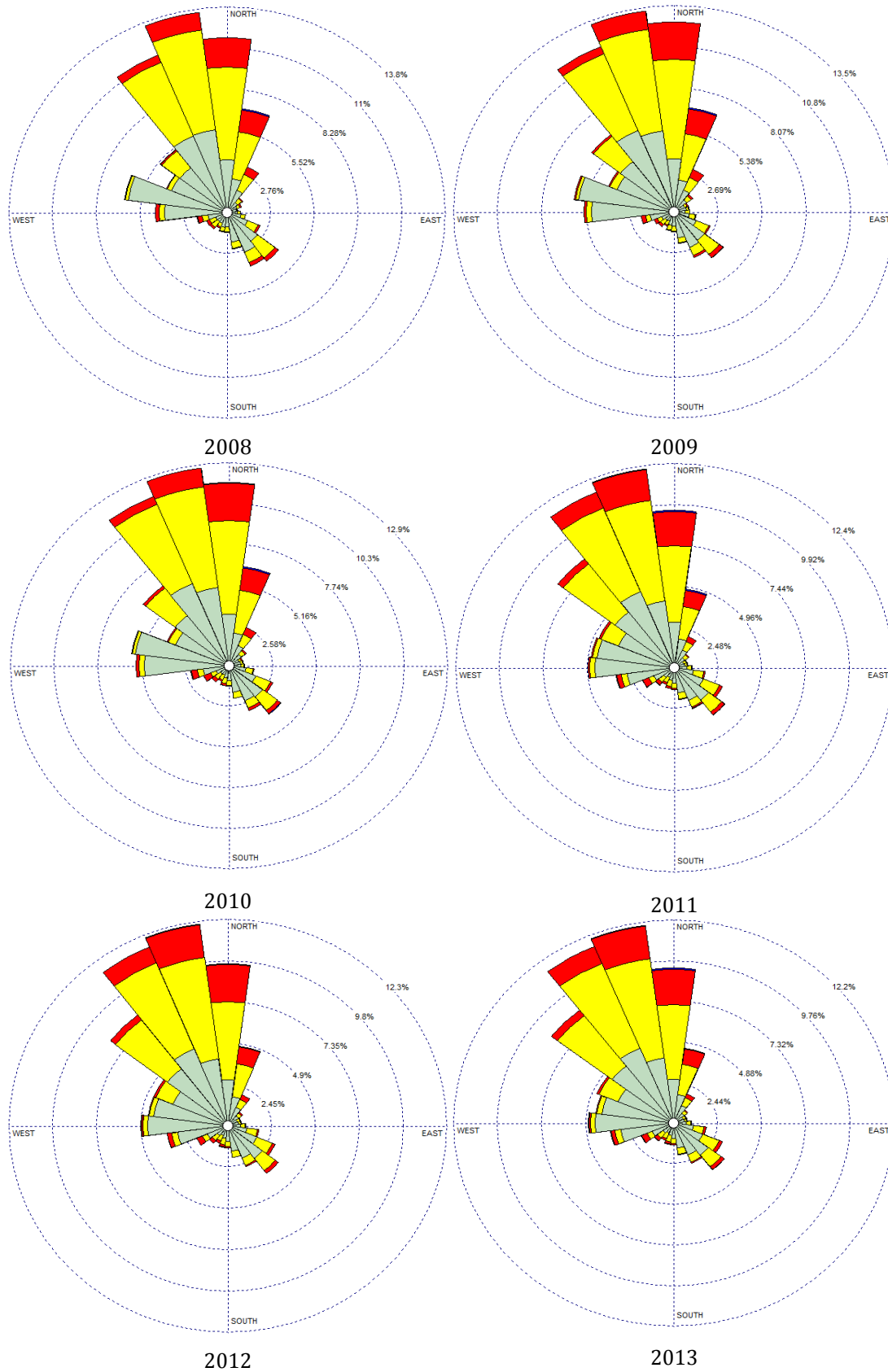
- PICCA, 2011. Programa para mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020.
- Pope, C. A. III; Muhlestein J. B.; May, H. T.; Renlund, D. G.; Anderson, J. L.; Horne, B. D. (2006). Ischemic heart disease events triggered by short-term exposure to fine particulate air pollution. *Circulation*, 114: 2443-2448.
- Ruiz, J. F. 1999. Subdirección de Meteorología. Análisis de los parámetros que describen la capa límite planetaria (CLP) para Santa Fe de Bogotá. Estación Meteorológica del Aeropuerto El Dorado. IDEAM. Bogotá.
- Sánchez de Rivera, P.D. 1987. Estadística Modelos y Métodos. Modelos lineales y series temporales. Alianza editorial. Madrid.
- Sánchez, F.J. 2000. Introducción a la Estadística Empresarial. Universidad de Málaga. España.
- Sánchez de Rivera, P.D. 2002. Análisis de datos multivariantes. Mc Graw Hill. Madrid.
- Sandoval, H., Prendez, M., Ulrikensen P. 1993. Contaminación atmosférica de Santiago, estado actual y soluciones. Universidad de Chile y comisión de descontaminación Metropolitana.
- Schwartz, J., 2000. Harvesting and long term exposure effects in the relation between air pollution and mortality. *American Journal of Epidemiology*; 151:440-8.
- Shah A. S.; Lee, K. K.; McAllister D. A.; Hunter, A.; Nair, H; Whiteley, W.; Langrish, J. P.; Newby, D. E.; Mills, N. L. (2015). Short term exposure to air pollution and stroke: Systematic review and meta-analysis. *BMJ* 350: h1295.
- Semarnat, 2013. Calidad del aire: una práctica de vida.
- SEDEMA, 2006. Informe Climatológico Ambiental del Valle de México 2006.
- SEDEMA, 2013. Inventario de emisiones contaminantes y de efecto invernadero 2012.
- SEDEMA, 2016. Inventario de emisiones de la Ciudad de México. Contaminantes criterios, tóxicos y de efecto de invernadero, 2014.
- SEMARNAT, DDF, GEM, SSA (1996). Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000 (PROAIRE).
- SEMARNAT, DDF, GEM, SSA (2011). Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020 (PROAIRE).
- SEMARNAT, 2013. Calidad del aire: una práctica de vida.

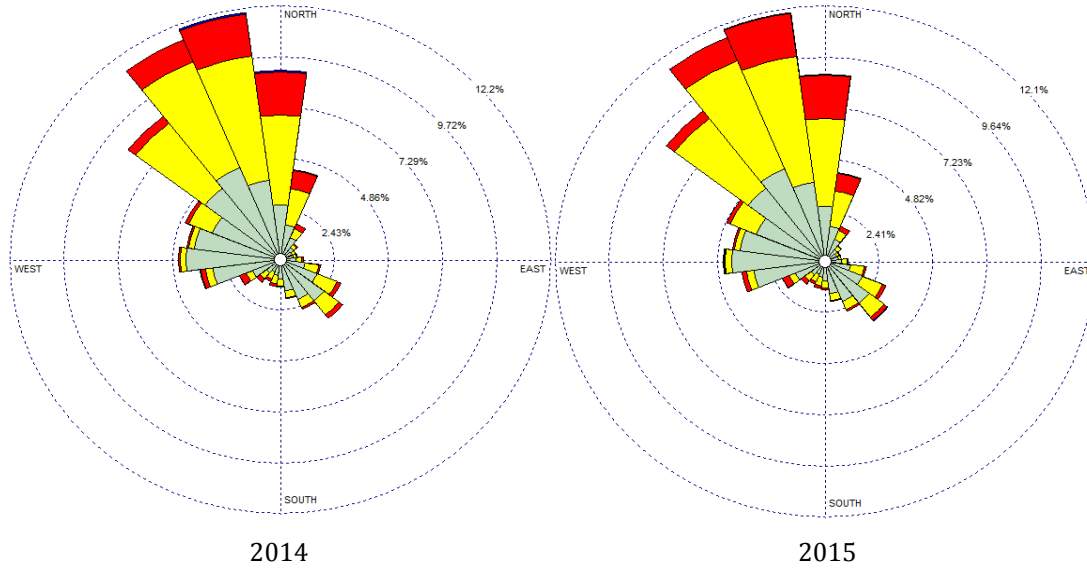
- SEMARNAT, 2014. Reglamento de la ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente en materia de prevención y control de la contaminación de la atmósfera.
- SEMARNAT, 2016. Estrategia Nacional de Calidad del Aire 2017-2030. Propuesta.
- SMA-GDF, 2003. Compendio estadístico del sistema de monitoreo atmosférico de la ZMVM 1886-2001.
- SMA-GDF, 2006. Informe Climatológico Ambiental del Valle de México.
- SMA-GDF, 2008. Informe Anual de la Calidad del Aire en la ZMCM.
- SMA-GDF, 2009. Informe Anual de la Calidad del Aire en la ZMCM.
- SMA-GDF, 2010. Informe Anual de la Calidad del Aire en la ZMCM.
- SMA-GDF, 2011. Informe Anual de la Calidad del Aire en la ZMCM.
- SMA-GDF, 2012. Inventario de Emisiones de Emisiones contaminantes y de Efecto Invernadero.
- SMA-GDF, 2013. Informe Anual de la Calidad del Aire en la ZMCM.
- SMA-GDF, 2014. Informe Anual de la Calidad del Aire en la ZMCM.
- SMA-GDF, 2014. Inventario de Emisiones de la CDMX.
- SMA-GDF, 2015. Informe Anual de la Calidad del Aire en la ZMCM.
- SMA-GDF, 2017. Informe Anual de la Calidad del Aire en la CDMX 2016.
- Spiegel, M.R. 1978. Teoría y Problemas de Estadística. McGraw Gil. México.
- U.S EPA, 1993. Methods for measuring the acute toxicity of effluents and receiving waters to freshwater and marine organisms. Fourth Edition.
- US EPA. Air quality criteria for particulate matter. U.S. Environmental Protection Agency (2004). Research Triangle Park, NC. EPA/600/P-99/002aF-bF.
- US EPA. Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter Final Report (2009). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-08/139F.
- E. Vega, E. Reyes, G. Sanchez, E. Ortiz, M. Ruiz, J. Chow, J. Watson, S. Edgerton Basic statistics of PM_{2.5} and PM₁₀ in the atmosphere of Mexico City Science of the Total Environment, 287 (2002), pp. 167-176.
- E. Vega, E. Reyes, H. Ruiz, J. García, G. Sánchez, G. Martínez Villa, U. González. Analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ in the atmosphere of Mexico City during 2000-2002 Journal of the Air and Waste Management Association, 54 (2004), pp. 786-798

- Vega, E., Eidels, S., Ruiz, H., López-Veneroni, D., Sosa, G., González, E., & Edgerton, S. A.: Particulate air pollution in Mexico City: a detailed view. *Aerosol Air Qual Res* 10(3), 193-211 (2010).
- Vega, E., Ruiz, H., Escalona, S., Cervantes, A., Lopez-Veneroni, D., Gonzalez-Avalos, E., & Sanchez-Reyna, G.: Chemical composition of fine particles in Mexico City during 2003-2004. *Atmos Pollut Res* 2 (4), (2011).
- Viers, G. 1981. *Climatología. Elementos de geografía*. Barcelona. España.
- Wark, K., Warner, C.F. 1999. *Contaminación del Aire. Origen Y Control*. Editorial Limusa. México.
- WATHERN, P. 1988. An introductory guide to EIA. In: P. Wathern (org.), *Environmental impact assessment. Theory and practice*. Unwin Hyman, London, p. 3-30.
- Wilks, D.S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. 1995. San Diego. California.

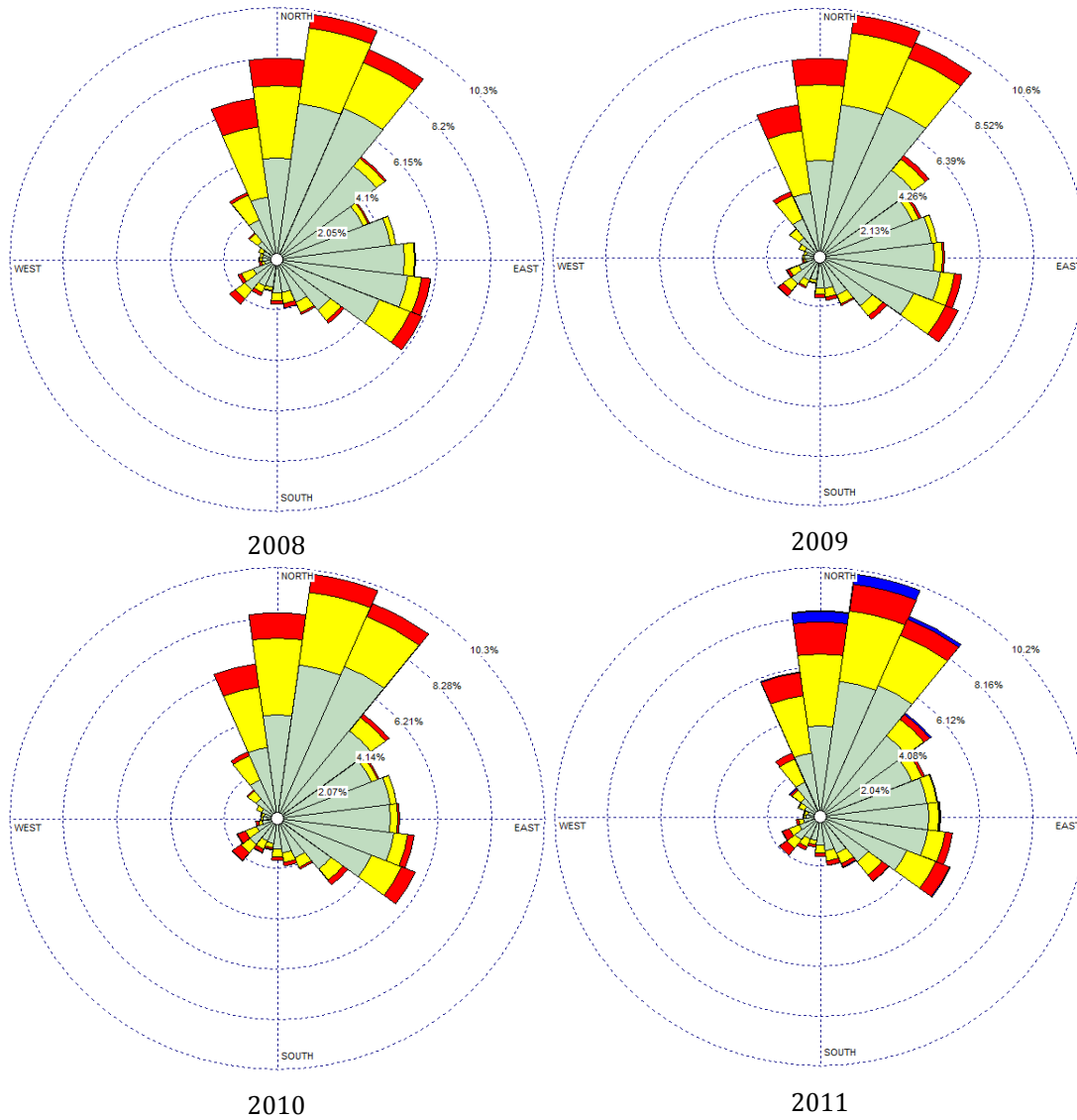
ANEXOS

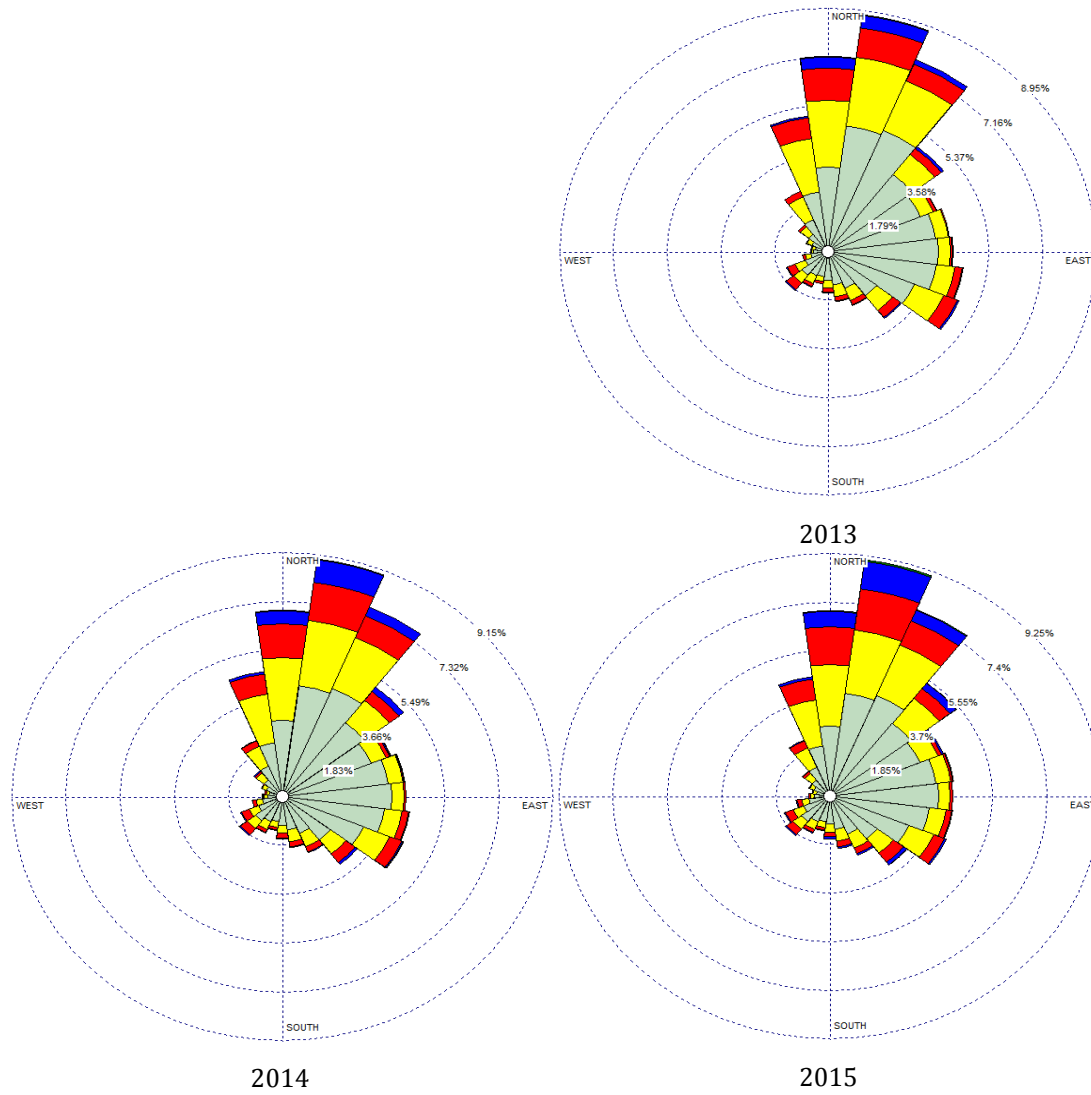
Anexo 1 Rosa de viento anuales de la estación Tlalnepantla (2008-2015).



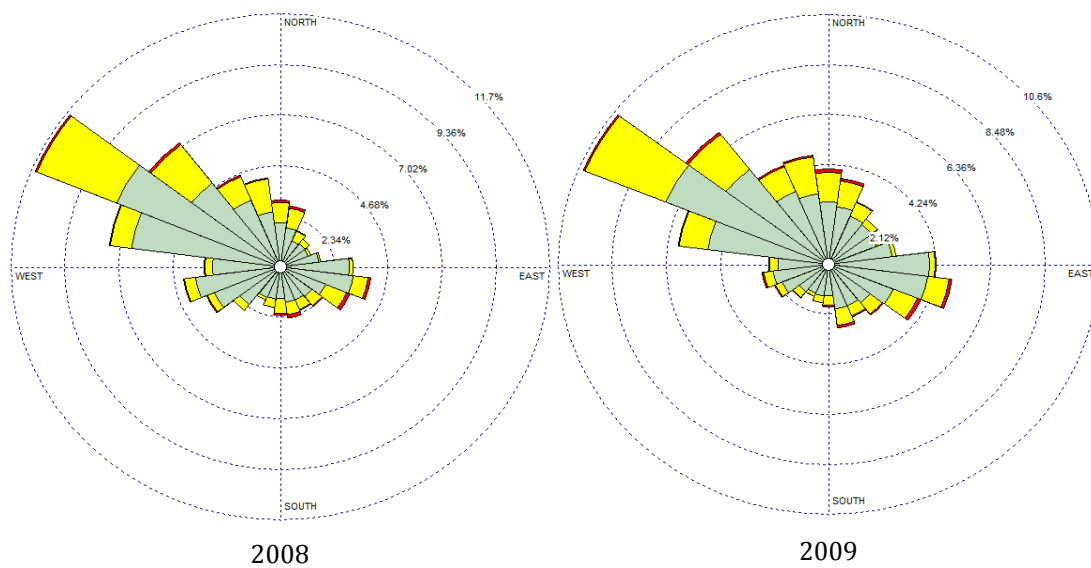


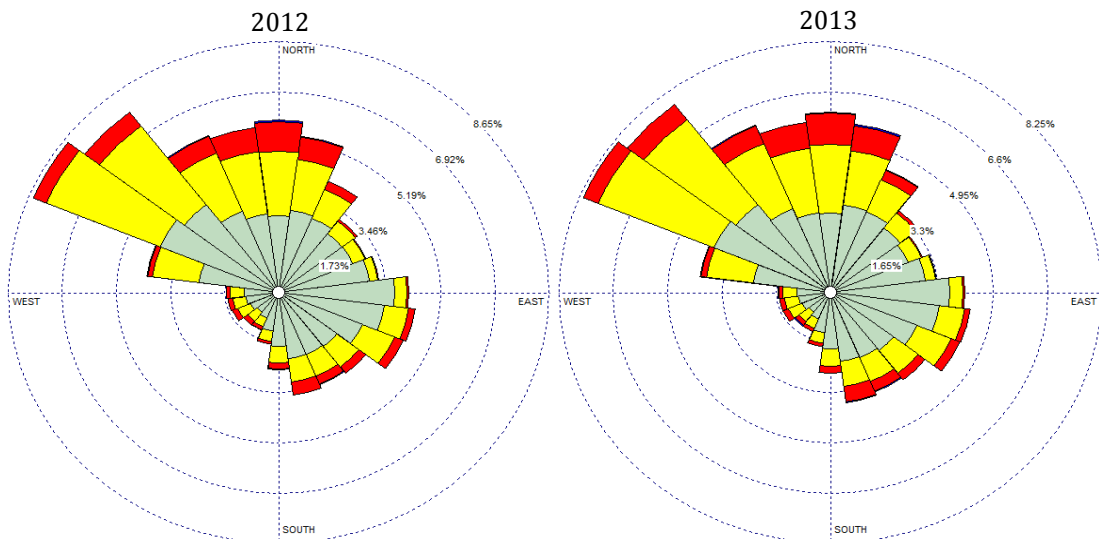
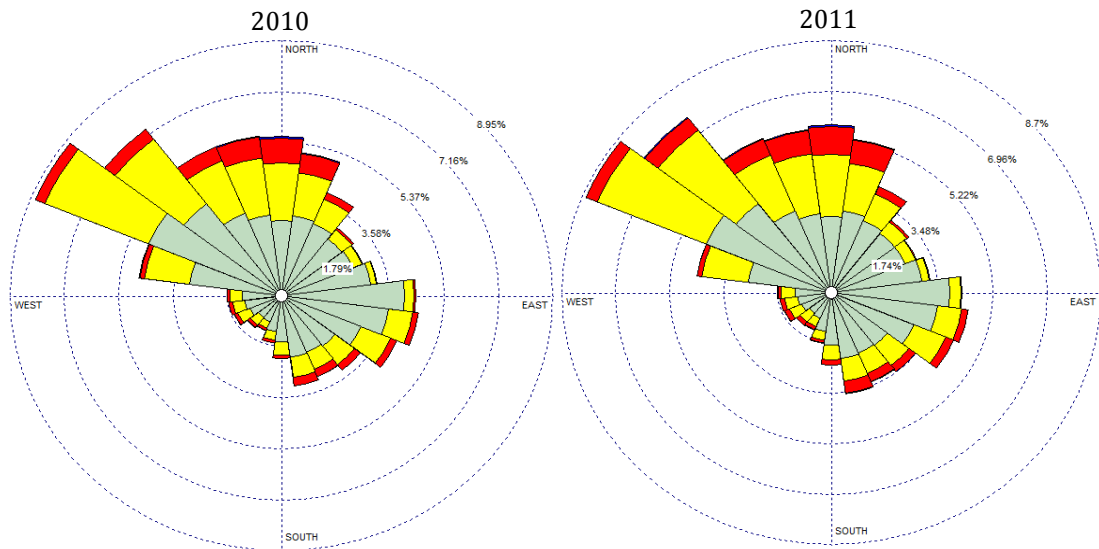
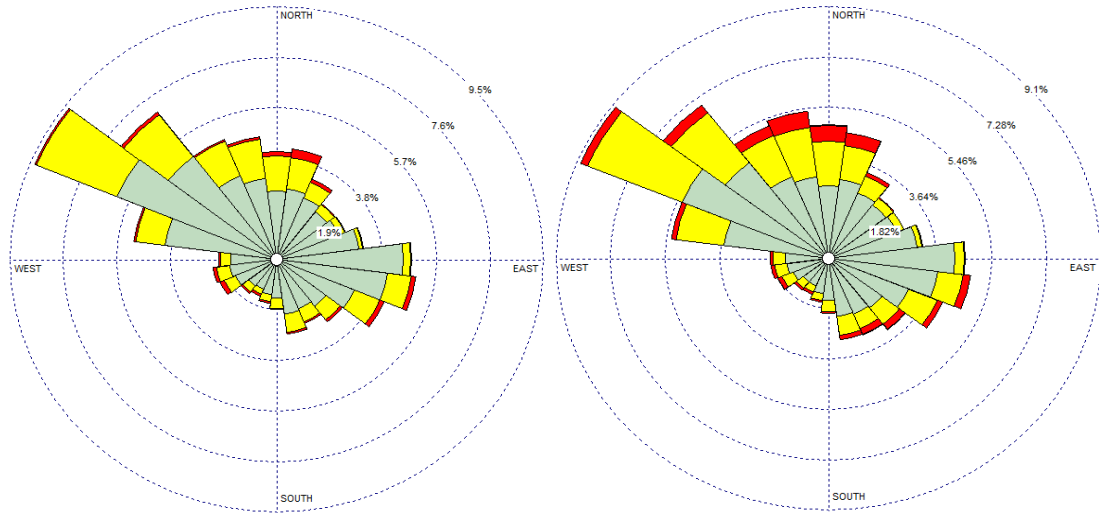
Anexo 2 Rosa de viento anuales de la estación Xalostoc (2008-2015).



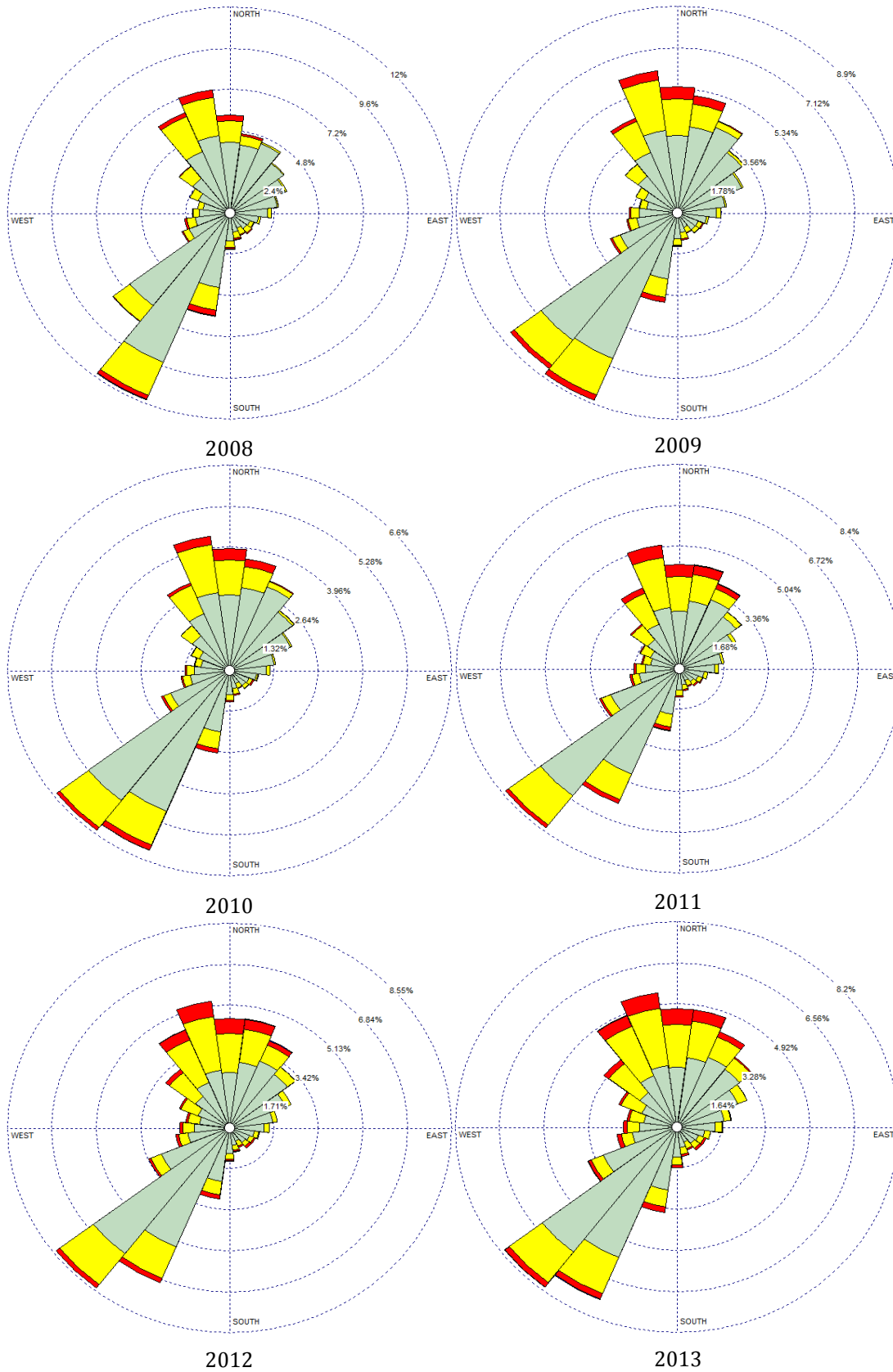


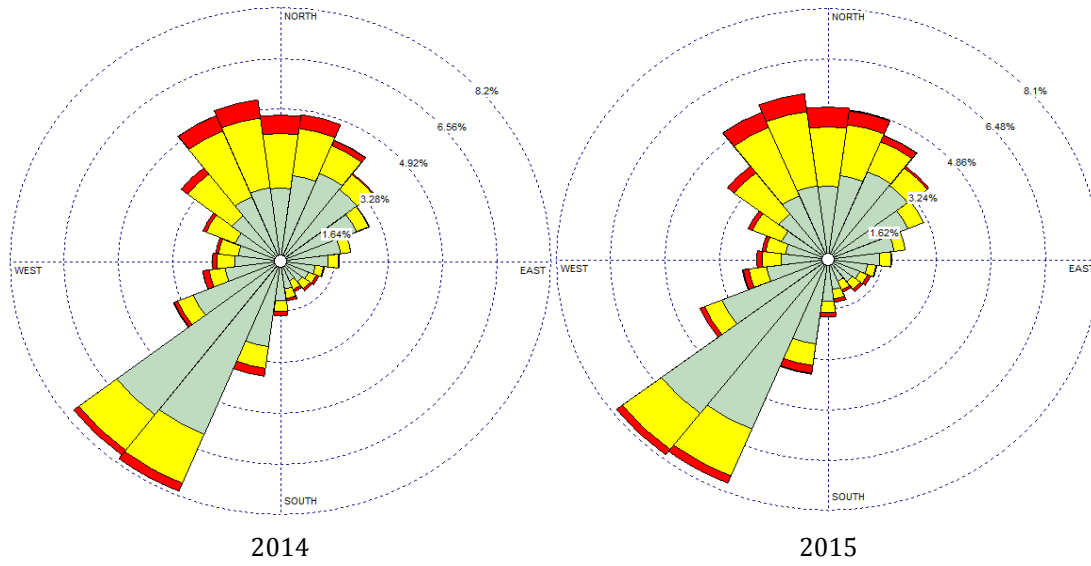
Anexo 3 Rosa de viento anuales de la estación Merced (2008-2015)



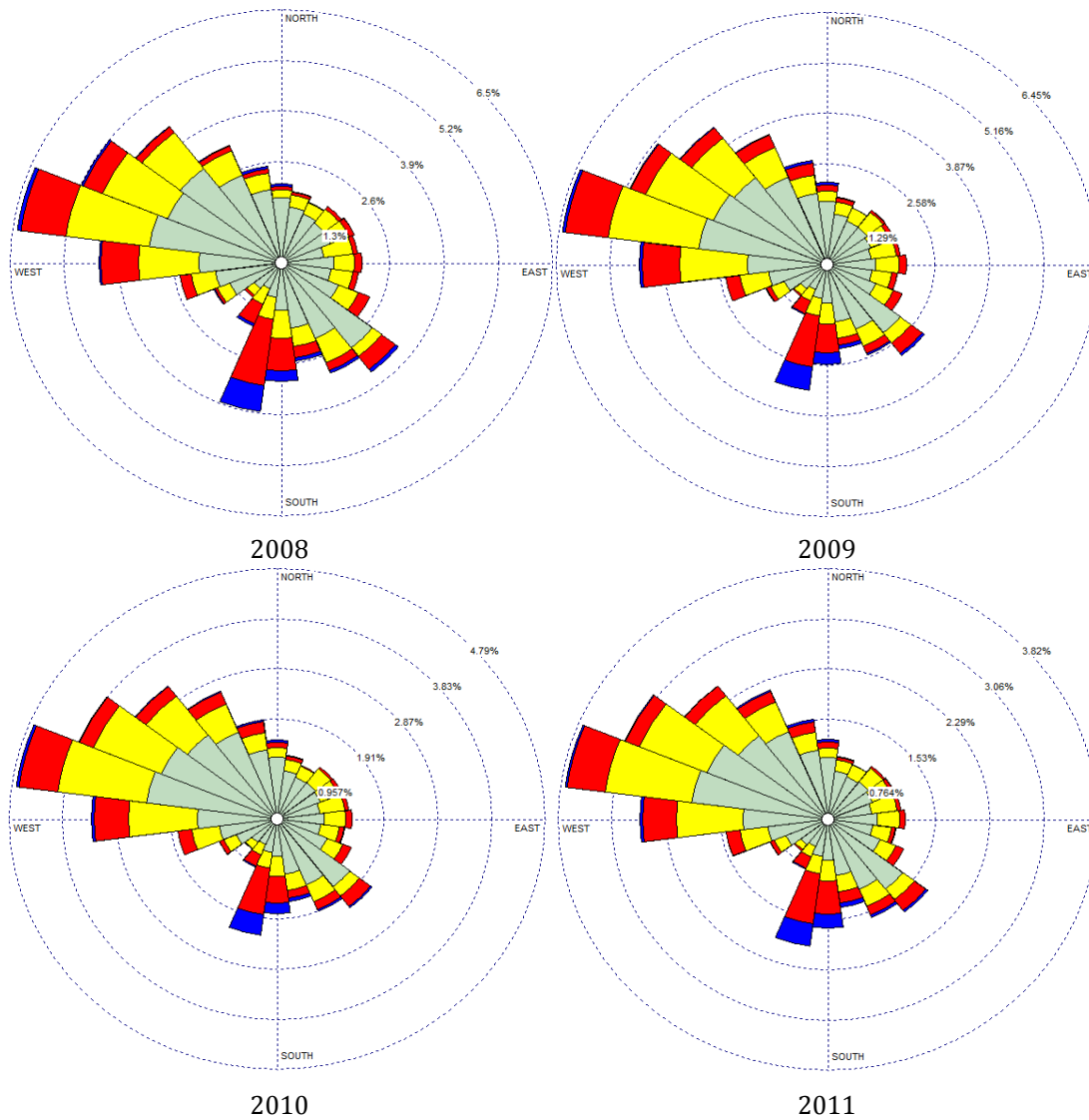


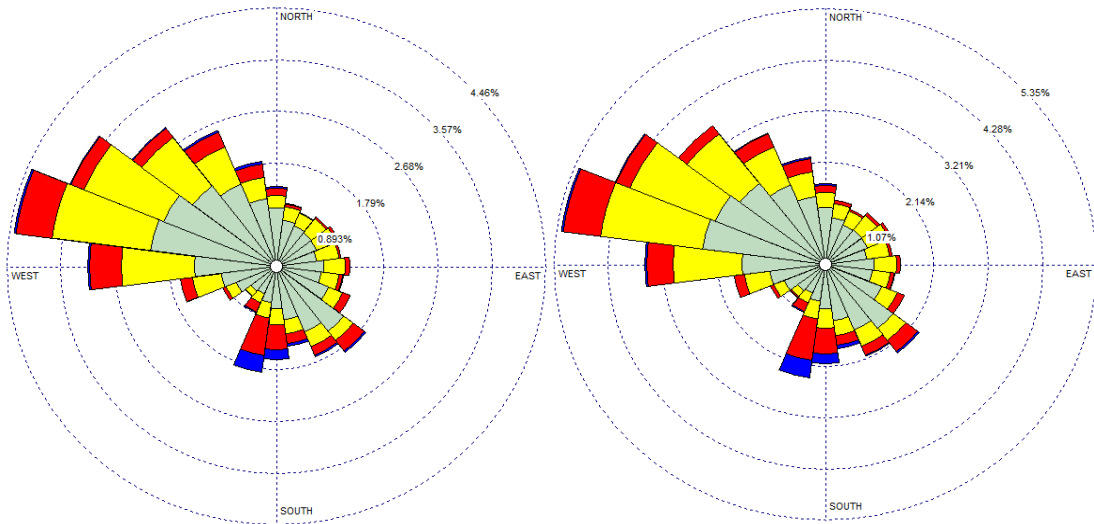
Anexo 4 Rosa de viento anuales de la estación Pedregal (2008-2015)





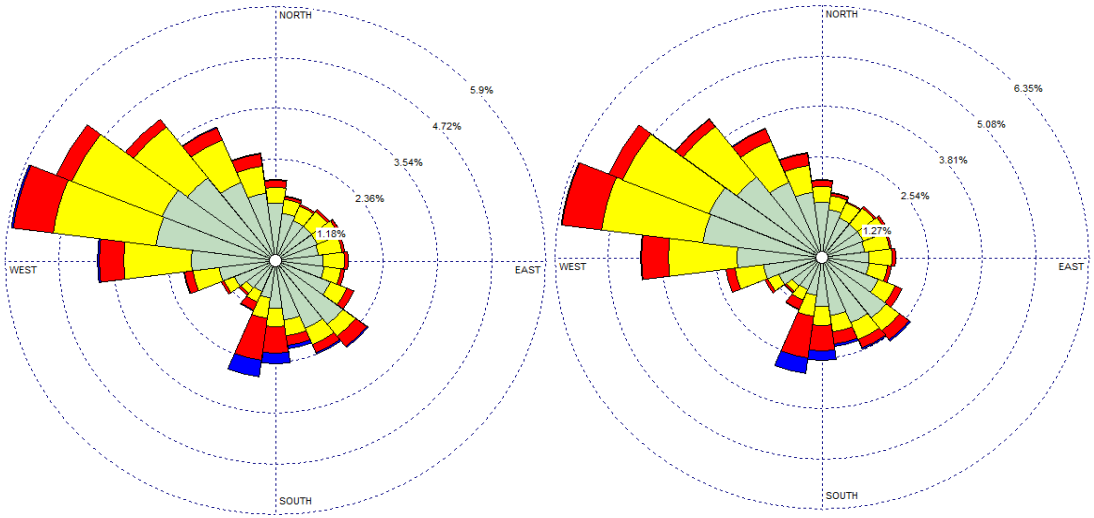
Anexo 5 Rosa de viento anuales de la estación Tláhuac (2008-2015).





2012

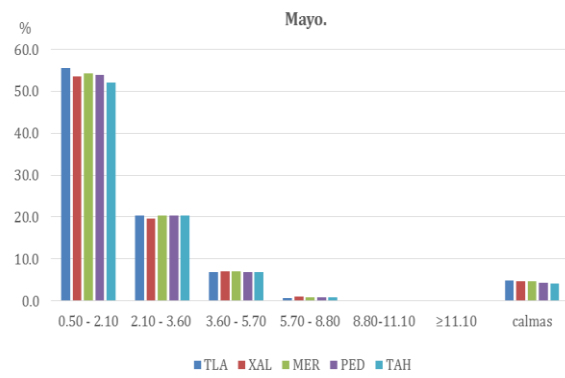
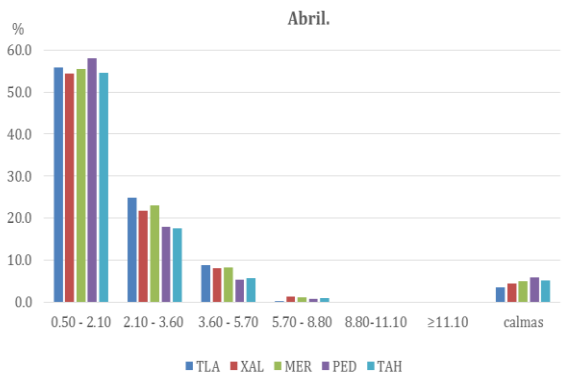
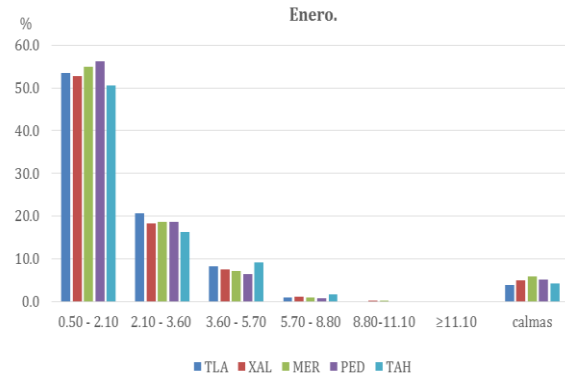
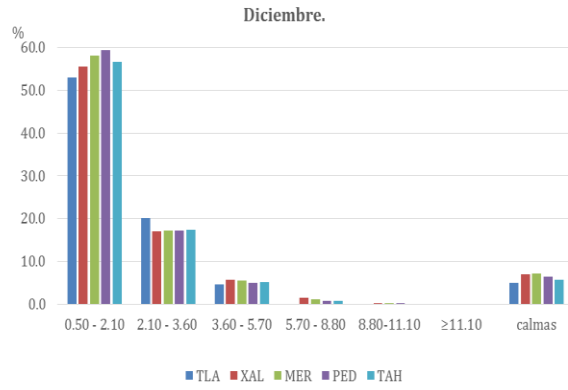
2013



2014

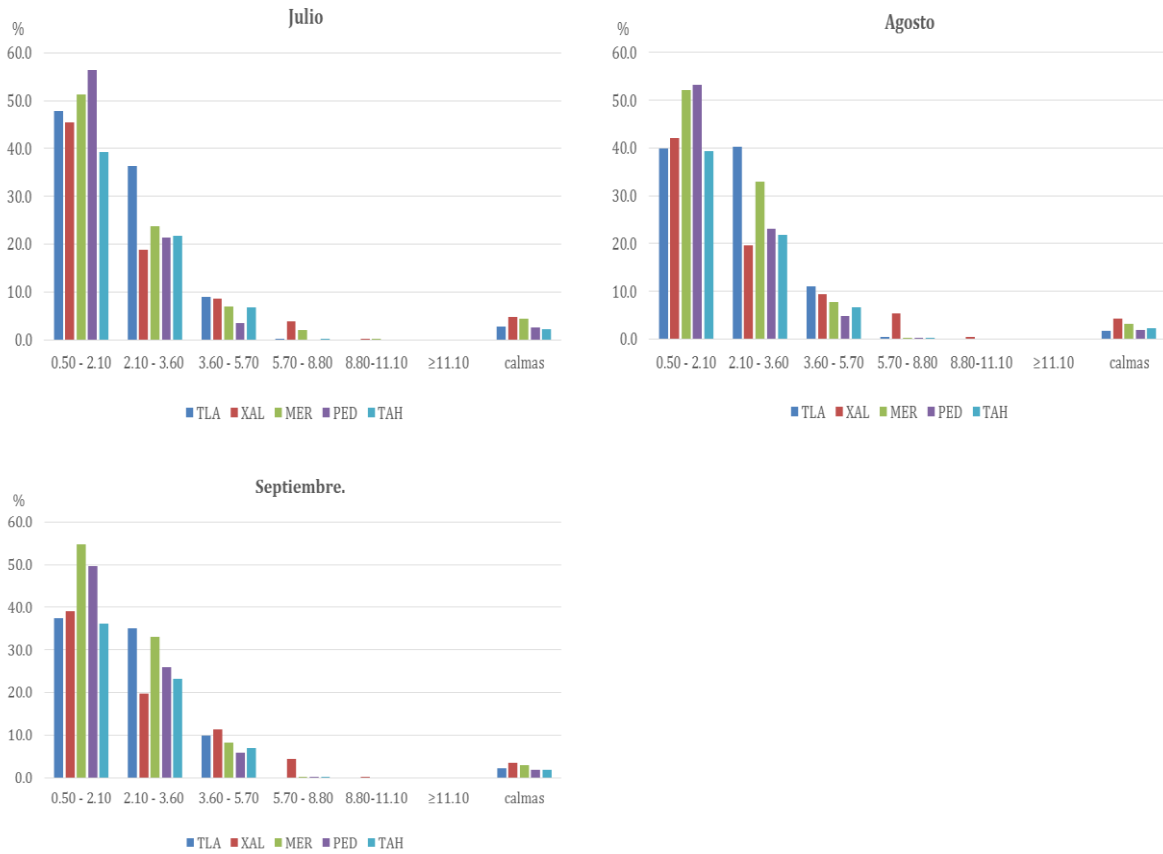
2015

Anexo 6 Distribución de frecuencias por categorías de velocidad del viento para las estaciones Tlalnepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Tláhuac para diciembre, enero, abril y mayo. (Período 2008-2015)

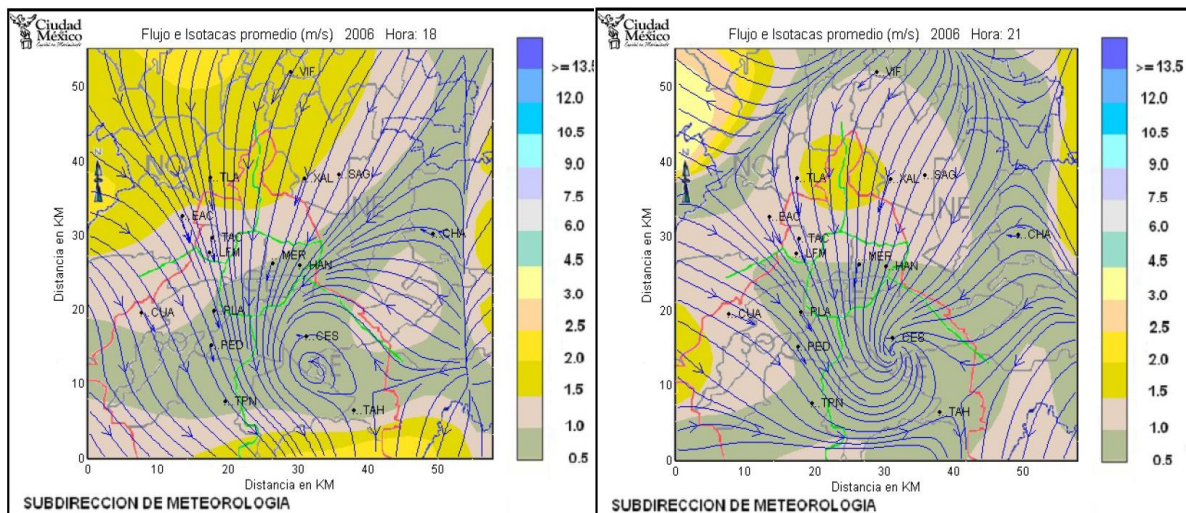


ANEXOS

Anexo 7 Distribución de frecuencias por categorías de velocidad del viento para las estaciones Tlalnepantla, Xalostoc, Merced, Pedregal y Tláhuac para julio, agosto y septiembre. (Período 2008-2015)



Anexo 8 Líneas de flujo e isotacas del viento promedio anual en el Valle de México a las 18:00 y 21:00 horas.



(Fuente: Informe anual climatológico, 2006).